

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PEDAGÓGICO PARA EL DISEÑO DE  
SISTEMAS DE TAMICES MOLECULARES PARA LA DESHIDRATACIÓN DE  
GAS NATURAL**

**SILVIA JOHANNA PLATA JAIMES  
BRANDON FAVIANY CASAS MARIN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE PEDAGÓGICO PARA EL DISEÑO DE  
SISTEMAS DE TAMICES MOLECULARES PARA LA DESHIDRATACIÓN DE  
GAS NATURAL**

**SILVIA JOHANNA PLATA JAIMES  
BRANDON FAVIANY CASAS MARIN**

**Trabajo de grado para optar el título de:  
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Director  
Manuel Enrique Cabarcas Simancas  
MSc. en Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2018**

## DEDICATORIA

A Dios por darme vida y salud para hoy poder culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres, Marlene Jaimes y Nelson Plata por formarme como persona, por enseñarme valores, por esforzarse para que hoy pueda estar terminando esta meta un día soñada, por amarme, por ser quienes me impulsan a soñar y por ser esos motores para mi vida.

A mi hermana Yessika Plata, por ser la mejor hermana, la mejor amiga y mi segunda mamá, por enseñarme a luchar por lo que quiero, por su paciencia, por su grande amor, por sus consejos y por ser mi ejemplo a seguir en cada aspecto de la vida.

A mi amor y compañero de tesis Brandon Casas, por la entrega y dedicación a este proyecto, por la paciencia que me tuvo en los momentos difíciles, por su apoyo, por las sonrisas sacadas y por el amor entregado.

A mis amigos Sandri y Diego, por ser esas personas de apoyo durante toda la carrera, definitivamente nada hubiera sido igual sin ustedes en cada una de las clases vistas, en cada traspasada y por su amistad incondicional.

A mi amigo Nico por enseñarme que no es necesario hablar todos los días o verse a cada momento, para contar incondicionalmente con un amigo, como lo ha sido hasta este momento.

***Silvia Plata Jaimes***

## DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios por permitirme culminar esta grandiosa esta y comprender el verdadero valor del tiempo.

A mis padres Pedro Gonzalo Casas Espinel y Gloria Patricia Marin Marin, por apoyarme, creer en mí y darme fortaleza en los momentos difíciles, que sin ellos este gran logro no sería posible.

A mis hermanos Johan Casas, Pedro Casas y Martin Casas por ser mi motor de lucha e inspiración.

A mi abuela Guillermina, la cabeza de una gran familia que nos enseñó la importancia de esta y su unión.

A toda la familia Casas por cada uno de sus consejos y enseñanzas.

A mi amor Silvia Plata, que estuviste apoyándome y direccionándome, acompañándome y dándome consejo, y por hacer este proyecto posible.

A mis amigos Valeria Torres, Diego Cáceres, Felipe Villalba, Erika Peña, Leidy Mahecha, Javier Robayo que hicieron más ameno este camino y se convirtieron en mi familia.

A mis demás amigos que sería difícil nombrarlos a todos, con los cuales se pasaron noches largas de estudio y celebración, unas más que otras y me acompañaron durante toda la carrera.

***Brandon Casas Marin***

## **AGRADECIMIENTOS**

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER por sus grandiosos maestros que nos formaron en academia y vida, dándonos las armas necesarias para enfrentar el camino venidero.

A el Ingeniero Manuel Enrique Cabarcas Simancas por su acompañamiento y exigencia en busca de la excelencia del proyecto

A Néstor Mendoza por su apoyo y colaboración en las dudas surgidas durante la programación.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	20
1. GENERALIDADES .....	22
1.1 GAS NATURAL.....	22
1.1.1 Propiedades del gas .....	23
1.2 DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL.....	27
1.2.1 Deshidratación con tamices moleculares.....	29
1.2.1.1 Principales fenómenos físicos.....	29
1.2.1.2 Propiedades del tamiz molecular .....	30
1.2.1.3 Descripción del proceso básico .....	32
2. SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN DEL GAS CON TAMICES MOLECULARES .....	37
2.1 EQUIPOS INDIVIDUALES.....	38
2.1.1 Separador o Scrubber.....	39
2.1.2 Horno o calentador .....	41
2.1.3 Aero-enfriador .....	43
2.1.4 Compresor .....	45
2.1.5 Torre de adsorción.....	46
2.2 DISEÑO DE ADSORCIÓN.....	47
2.2.1 Metodología de cálculo .....	49
2.3 DISEÑO DE REGENERACIÓN .....	54
2.3.1 Calentamiento.....	55
2.3.1.1 Metodología de cálculo .....	56
2.3.2 Enfriamiento.....	59
2.3.2.1 Metodología de cálculo .....	59

3. TENDENCIAS EN LA ENSEÑANZA DE LAS INGENIERÍAS .....	61
4. SOFTWARE PEDAGÓGICO “GD-SIEVE” .....	67
4.1 INTRODUCCIÓN .....	67
4.2 VALIDACIÓN .....	75
5. CONCLUSIONES .....	78
6. RECOMENDACIONES .....	79
BIBLIOGRAFIA .....	80
ANEXOS .....	85

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Sistema básico de dos torres con tamiz molecular.....	33
Figura 2. Operación de las torres en adsorción y regeneración.....	34
Figura 3. Sistema de deshidratación con tamices moleculares. ....	38
Figura 4. Torre de adsorción típica. ....	47
Figura 5. Progreso de la zona de transferencia de masa (MTZ) a través del lecho para el avance. ....	48
Figura 6. Curva de equilibrio estática para el tamiz molecular.....	53
Figura 7. Curvas de temperatura calentamiento y enfriamiento.....	54
Figura 8. Espesor de pared de la torre dependiente de la presión .....	56
Figura 9. Artículos de investigación indexados en ELSEVIER relacionados con software educativo. ....	63
Figura 10. Artículos de investigación indexados en ELSEVIER relacionados con Educational software and computer Science y Engineering. ....	64
Figura 11. Artículos de investigación indexados en ELSEVIER relacionados con Educational software en algunas ingenierías.....	65
Figura 12. Interfaz y/o ventana inicial del software GD-SIEVE .....	68
Figura 13. Video del horno.....	68
Figura 14. Ventana inicial para el diseño del Scrubber.....	69
Figura 15. Ventana inicial para el diseño del Aero-enfriador .....	70
Figura 16. Ventana inicial para el diseño del horno .....	71
Figura 17. Ventana inicial para el diseño de la torre de adsorción.....	72
Figura 18. Ventana inicial para el diseño de la torre de regeneración .....	72
Figura 19. Ventana inicial para el diseño del compresor .....	73
Figura 20. Ventana para el diseño del sistema completo de deshidratación con tamices moleculares .....	74
Figura 21. Ventana final del aero-enfriador.....	74

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Constantes para el cálculo de la capacidad calorífica .....	26
Tabla 2. Máximo diámetro molecular adsorbido por los tipos de zeolitas .....	31
Tabla 3. Formas y tamaños disponibles de zeolitas .....	31
Tabla 4. Propiedades típicas del tamiz molecular.....	32
Tabla 5. Factor Ks para cada tipo de extractor de niebla.....	40
Tabla 6. Constantes B y C .....	50
Tabla 7. Validación de las propiedades del gas.....	75
Tabla 8. Validación del módulo 1: Scrubber .....	75
Tabla 9. Validación del módulo 2: aero-enfriador.....	76
Tabla 10. Validación del módulo 3: horno .....	76
Tabla 11. Validación del módulo 4: Torres de deshidratación .....	76
Tabla 12. Validación del módulo 5: Compresor .....	77

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Manual del usuario .....	85

## NOMENCLATURA

<b><i>a</i></b> :	Constante
<b><math>\alpha</math></b> :	alfa para el cálculo de Peng Robinson
<b><math>a_i</math></b> :	a para compuestos puros
<b><math>a\alpha_m</math></b> :	a para mezclas
<b><i>A</i></b> :	Constante, [ <i>scf/dia</i> ] Factor de peso, [ <i>horas</i> ] Parámetro para solución de ecuación cúbica Parámetro para el cálculo contenido de agua Fracción molar de H <sub>2</sub> S y CO <sub>2</sub>
<b><i>b</i></b> :	Constante
<b><math>b_i</math></b> :	Parámetro b para compuestos puros
<b><math>b_m</math></b> :	Parámetro b para mezclas
<b><i>B</i></b> :	Fracción molar de H <sub>2</sub> S Parámetro para el cálculo contenido de agua Parámetro para solución de ecuación cúbica Constante tipo de partícula
<b><i>C</i></b> :	Factor de conversión Constantes tipo de partícula
<b><math>C_p</math></b> :	Capacidad calorífica del gas, [ <i>BTU/lbm – °F</i> ]
<b><math>C_{pa}</math></b> :	Calor específico del acero, [ <i>BTU/lbm°F</i> ]
<b><math>C_{pd}</math></b> :	Calor específico del desecante, [ <i>BTU/lbm°F</i> ]
<b><math>C_{pw}</math></b> :	Calor específico del agua, [ <i>BTU/lbm°F</i> ]
<b><i>d</i></b> :	Diámetro de la torre, [ <i>ft</i> ] Diámetro del lecho, [ <i>ft</i> ] Diámetro interno de la torre, [ <i>in</i> ]
<b><math>\rho</math></b> :	Densidad del gas, [ <i>lbm/ft<sup>3</sup></i> ]

$\rho_B$ :	Densidad aparente, $[lbm/ft^3]$
$\rho_r$ :	Densidad reducida
$\varepsilon$ :	Factor de ajuste pseudo-crítico
$\varepsilon_m$ :	Parámetro de la viscosidad de la mezcla
$h$ :	Longitud de la carcasa entre costuras, $[ft]$ Espesor de la carcasa, $[in]$
$h_B$ :	Altura del lecho, $[ft]$
$HEC$ :	Concentración equivalente de $H_2S$ y $CO_2$
$h_z$ :	Altura de la zona MTZ, $[ft]$
$m$ :	Parámetro para el cálculo de Peng Robinson Masa del gas de calentamiento $[lbm/h]$
$M$ :	Peso molecular del heptano plus, $[lbm/lbmol]$
$m_d$ :	Masa del desecante, $[lbm]$
$m_s$ :	Masa de acero, $[lbm]$
$m_w$ :	Carga de agua por ciclo, $[lbm H_2O/ciclo]$
$MW_a$ :	Peso molecular aparente, $[lbm/lbmol]$
$MW_i$ :	Peso molecular de cada componente, $[lbm/lbmol]$
$n$ :	Número de lechos
$P$ :	Presión del gas, $[psia]$
$P_c$ :	Presión crítica, $[psia]$
$P_{ci}$ :	Presión crítica de cada componente, $[psia]$
$P_{pc}$ :	Presión pseudo-crítica, $[psia]$
$P'_{pc}$ :	Presión pseudo-crítica corregida, $[psia]$
$P_{pr}$ :	Presión pseudo-reducida, $[psia]$
$P_s$ :	Presión estándar, $[psia]$
$\Delta P/L$ :	Relación de caída de presión/altura, $[psi/ft]$
$Q_a$ :	Carga de calentamiento del acero, $[BTU]$
$q_a$ :	Tasa de flujo de gas actual, $[ft^3/min]$
$Q_c$ :	Carga de enfriamiento, $[BTU]$

$Q_d$ :	Carga de calentamiento del desecante, [BTU]
$Q_g$ :	Flujo de gas, [MMscfd]
$Q_H$ :	Carga de calentamiento, [BTU]
$q_s$ :	Flujo de gas estándar, [scf/dia]
	Caudal estándar de gas de regeneración, [scf]
$Q_{ws}$ :	Carga de calentamiento agua (sensible), [BTU]
$Q_{wd}$ :	Carga de calentamiento agua (desorción), [BTU]
$r$ :	Radio del lecho, [ft]
$R$ :	Constante universal de los gases, [psia * ft <sup>3</sup> /lbmmol * °R]
$RH$ :	Humedad relativa del gas, [%]
$T$ :	Temperatura del gas, [°F]
$t_a$ :	Tiempo de adsorción, [horas]
$T_b$ :	Temperatura de ebullición, [°R]
$T_B$ :	Temperatura promedio entre T <sub>2</sub> y T <sub>3</sub> , [°F]
$T_c$ :	Temperatura crítica, [°F]
$T_{ci}$ :	Temperatura crítica de cada componente, [°F]
$T_H$ :	Temperatura a la salida del calentador, [°F]
$T_{pc}$ :	Temperatura pseudo-crítica, [°F] o [°R]
$T'_{pc}$ :	Temperatura pseudo-crítica corregida, [°F]
$T_{pr}$ :	Temperatura pseudo-reducida, [°F] o [°R]
$t_r$ :	Tiempo de regeneración, [horas]
$T_s$ :	Temperatura gas estándar, [°R]
$T_1$ :	Temperatura inicial del lecho, [°F]
$T_4$ :	Temperatura de salida del lecho, [°F]
$T_5$ :	Temperatura a la cual termina el ciclo de enfriamiento, [°F]
$V_g$ :	Velocidad del gas, [ft/min]
$\mu_g$ :	Viscosidad del gas, [cP]
$\mu_1$ :	Viscosidad del gas a 1 atmosfera, [cP]
$W$ :	Contenido de agua, [lbmH <sub>2</sub> O/MMscf]

$\omega$ :	Factor acéntrico
$x$ :	Capacidad útil del desecante, [%]
$x_s$ :	Capacidad dinámica del desecante, [%]
$y_i$ :	Fracción molar i
$y_j$ :	Fracción molar j
$\gamma$ :	Gravedad específica
$Z$ :	Factor de compresibilidad
$\theta$ :	Relación temperaturas
$\theta_B$ :	Tiempo del ciclo, [horas]
$\theta_H$ :	Tiempo del ciclo de calentamiento, [BTU]

## RESUMEN

**TITULO: DESARROLLO DE UN SOFTWARE PEDAGÓGICO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE TAMICES MOLECULARES PARA LA DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL\***

**AUTOR:** SILVIA JOHANNA PLATA JAIMES  
BRANDON FAVIANY CASAS MARIN \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Gas natural, deshidratación, desecantes, tamiz molecular, adsorción, software pedagógico.

### **DESCRIPCIÓN:**

Este trabajo presenta un software educativo desarrollado para el diseño de los equipos involucrados en el sistema de deshidratación del gas natural con tamices moleculares para los estudiantes de pregrado de Ingeniería de Petróleos. Entre los equipos se encuentran el scrubber, horno, compresor, aero-enfriador, torre de adsorción y de regeneración. El diseño modular en la interfaz del software permite a los estudiantes avanzar de forma intuitiva a los formularios de entrada y a las respuestas parciales, enfocándose así en el análisis de los resultados y no en aprender el manejo del programa. Asimismo, se incorporan gráficos bidimensionales y videos didácticos con el fin de que el usuario pueda comprender de una mejor forma los fenómenos físicos que ocurren en cada uno de los equipos. El software educativo ha sido diseñado de forma familiar para los estudiantes ya que sigue la misma metodología y orden presentado en las clases del curso de Ingeniería del gas dictado en la Universidad Industrial de Santander.

La implementación del software tanto comercial como educativo en las aulas de clases se da debido al cambio que en los últimos años se ha presentado en la enseñanza/aprendizaje de la ingeniería, sin embargo, el software comercial requiere de un conocimiento previo de su uso lo que dificulta el aprendizaje. Por lo tanto, el software pedagógico es la mejor alternativa ya que facilita el desarrollo de proyectos en los que el estudiante puede desarrollar y/o mejorar su habilidad de análisis por medio del escaneo de un problema real, y no centrarse en cálculos repetitivos. Además, permite que el futuro profesional se mantenga actualizado con el constante desarrollo de las nuevas tecnologías.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Escuela de Ingeniería de Petróleos. Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas, Msc. en Ingeniería Química.

## ABSTRACT

**TITLE: DEVELOPMENT OF A PEDAGOGICAL SOFTWARE FOR THE DESIGN OF MOLECULAR SIEVE SYSTEMS FOR THE DEHYDRATION OF NATURAL GAS \***

**AUTHOR: SILVIA JOHANNA PLATA JAIMES  
BRANDON FAVIANY CASAS MARIN\*\***

**KEYWORDS:** Natural gas, Dehydration, desiccants, molecular sieves, adsorption,

### **DESCRIPTION:**

This paper presents an educational software developed for the design of the equipment involved in the dehydration system of natural gas with molecular sieves for the undergraduate students of Petroleum Engineering. Among the equipment are the scrubber, fire heater, compressor, air-cooler, adsorption and regeneration towers. The modular design in the software interface allows students to intuitively advance the entry forms and partial answers, focusing on analyzing the results and not learning how to use the program. Likewise, two-dimensional graphics and didactic videos are incorporated so that the user can better understand the physical phenomena that occur in each of the equipment. The educational software has been designed in a familiar way for the students since it follows the same methodology and order presented in the Gas Engineering course classes taught at the Industrial University of Santander.

The implementation of both commercial and educational software in the classroom is due to the change that in recent years has occurred in the teaching/learning of engineering, however, commercial software requires prior knowledge of its use, which hinders learning. Therefore, the pedagogical software is the best alternative since it facilitates the development of projects in which the student can develop and/or improve his analysis ability by means of scanning a real problem, and not focusing on repetitive calculations. In addition, it allows the future professional to keep updated with the constant development of new technologies.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* School of Petroleum Engineering. Faculty of Physicochemical Engineering. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas, Msc. in Chemical Engineering.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años es evidente que los desarrollos e innovaciones de ingeniería están avanzando a un ritmo cada vez más rápido, lo que conlleva a los educadores a adaptarse a las nuevas tecnologías, como las ayudas informáticas las cuales se están utilizando cada vez más. Sin embargo, los softwares educativos desarrollados para que los estudiantes lleven a la práctica los conceptos teóricos no son tan comunes. Los beneficios de dicha práctica son varios, siendo el punto de partida para el proceso de la educación autónoma y continua, capaz de permitir que el futuro profesional se mantenga actualizado con el creciente desarrollo de las nuevas tecnologías<sup>1</sup>.

En la industria de oil & gas, se encuentran diferentes softwares comerciales para el diseño de equipos y simulaciones de procesos, no obstante, los principales inconvenientes de estos softwares es que requieren un conocimiento previo de su uso y en algunos los conceptos de diseño o datos pedidos no son muy claros y dificultan el aprendizaje. Por tal motivo, es necesario la implementación de software pedagógicos ya que permiten que los estudiantes practiquen los conceptos de los temas dictados por el educador en el aula de clase, evitando los cálculos repetitivos y en algunos casos tediosos que hacen la clase menos productiva y en los estudiantes de las nuevas generaciones un poco aburrida.

Este trabajo presenta un software pedagógico desarrollado para el diseño de sistemas con tamices moleculares para la deshidratación del gas natural, en el que se ha tenido especial cuidado desarrollando la interfaz del programa con el fin de que los estudiantes se concentren en aprender los conceptos y fenómenos

---

<sup>1</sup> LONA BATISTA, Liliane, et al. Developing an educational software for heat exchangers and heat exchanger networks projects. [En línea]. Volumen 24. Campinas, Brazil, October 2001. [Consultado el 7 de junio de 2018]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(00\)00324-0](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00324-0)

físicos presentes en el sistema y no en cómo usar el programa. El software GD-SIEVE, fue desarrollado con el fin de que pueda ser utilizado en las clases de pregrado de Ingeniería de Petróleos en la asignatura de Ingeniería de gas, ya que el primer problema en la enseñanza de los sistemas de deshidratación de gas natural con tamices moleculares es la dificultad para los estudiantes de tener alguna idea de los equipos y su funcionamiento, porque la mayoría de ellos no han tenido la oportunidad de ver dicho sistema.

GD-SIEVE puede ayudar al educador a dar sus clases y lleva al estudiante a analizar los efectos de las decisiones sobre los parámetros y las condiciones operativas en cada uno de los equipos que compone el sistema. Además, el programa cuenta con ayudas didácticas como gráficos 2D que explican algunos parámetros del proceso; imágenes 2D de los equipos y videos del funcionamiento de estos.

## 1. GENERALIDADES

El gas natural por más de un siglo fue considerado como un subproducto del petróleo, y por lo tanto era quemado en teas hasta que se prohíbe su quema debido a la importancia que este comienza a tener en la contribución energética del mundo<sup>2</sup>. Actualmente, en más de 70 países se utiliza el gas natural para su desarrollo industrial, logrando mayor competitividad debido al menor costo de energía y la utilización directa en la industria del gas natural como insumo o como fuente de energía<sup>3</sup>.

### 1.1 GAS NATURAL

El gas natural es una fuente importante de energía que se encuentra en los campos petroleros y se define como un fluido homogéneo de baja viscosidad y densidad, conformado por una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso y de gases no hidrocarburos<sup>4</sup>. Los gases hidrocarburo que normalmente se encuentran en un gas natural son metano, etano, propano, butanos, pentanos y pequeñas cantidades de hexanos y más pesados. Los gases no hidrocarburo, es decir, las impurezas, incluyen dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno, vapor de agua, entre otros<sup>5</sup>, los cuales generan la necesidad de realizar tratamientos en el gas como el endulzamiento y la deshidratación, con el fin de

---

<sup>2</sup> GUERRERO, Fernando & LLANO, Fernando. Gas natural en Colombia-GAS e.s.p. Estudios Gerenciales Journal of Management and Economics for Iberoamérica. 2003.

<sup>3</sup> ZAMORA, María de los Angeles. Conceptos fundamentales de la ingeniería de producción de gas natural. Universidad Nacional Autónoma de México. 2015

<sup>4</sup> ECOPEPETROL S.A. Gas Natural: ¿Qué es el gas natural? [En línea]. Septiembre 2014. [Consultado el 22 de marzo de 2018]. Disponible en: [https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/gas-natural/Informaci%25C3%25B3n%2520General/que-es-el-gas-natural/%21ut/p/z0/04\\_Sj9CPykyssy0xPLMnMz0vMAfIjo8ziLQIMHd09DQy9DZwt3QwcjTwsQxw9g4I8nlz0C7IdFQEONbdQ/](https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/gas-natural/Informaci%25C3%25B3n%2520General/que-es-el-gas-natural/%21ut/p/z0/04_Sj9CPykyssy0xPLMnMz0vMAfIjo8ziLQIMHd09DQy9DZwt3QwcjTwsQxw9g4I8nlz0C7IdFQEONbdQ/)

<sup>5</sup> AHMED, Tarek. Equations of State and PVT Analysis: Applications for Improved Reservoir Modeling. [En línea]. 1ra Edición. Gulf Publishing Company. Houston, Texas, 2007. Disponible en: file:///E:/Downloads/Ahmed,%20T.%20-%20Equation%20of%20State%20and%20PVT%20Analysis.pdf

eliminar los contaminantes para la operación eficiente de las tuberías, las facilidades y el correcto funcionamiento de equipos de combustión de gas<sup>6</sup>.

**1.1.1 Propiedades del gas.** En el tratamiento del gas natural se ven involucradas diferentes propiedades físicas y químicas del gas, que son esenciales para el diseño de cada uno de los equipos implicados en el procesamiento de este. A continuación, se enuncian algunas de estas.

- **Peso Molecular Aparente:** Es una de las principales propiedades de interés para los ingenieros y se define mediante la siguiente ecuación.

$$MW_a = \sum y_i * MW_i \quad (\text{Ecuación 1})$$

- **Gravedad Específica:** Está definida como la relación entre la densidad del gas y la del aire. Ambas densidades se miden o expresan a la misma presión y temperatura. Comúnmente, la presión estándar,  $P_{sc}$ , y la temperatura estándar,  $T_{sc}$ , se usan para definir la gravedad específica del gas<sup>7</sup>. La gravedad específica también puede expresarse como la relación entre el peso molecular del gas y del aire, este último es de  $28.97 \text{ lbm/lbmol}$ .

$$\gamma = \frac{MW_a}{28.97} \quad (\text{Ecuación 2})$$

- **Factor de compresibilidad:** El factor de compresibilidad del gas,  $Z$ , es una cantidad adimensional, definida como la relación entre el volumen real de  $n$ -moles de gas a una presión y temperatura y el volumen ideal del mismo número de moles a la misma temperatura y presión.

---

<sup>6</sup> ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil handling systems and facilities. [En línea]. Volume 1. 3ra Edition. Gulf Professional Publishing Elsevier. Houston, Texas, Agosto, 2007. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7853-7.X5001-7>

<sup>7</sup> AHMED, Tarek. Op cit.

$$Z = \frac{V_{actual}}{V_{ideal}} = \frac{V}{(nRT)/P} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Sin embargo, el factor de compresibilidad debido a que es una mezcla de gases es calculado por medio de la ecuación de estado de Peng Robinson.

- **Densidad del gas:** La densidad de una mezcla se calcula mediante la siguiente ecuación reemplazando el peso molecular aparente, presión y temperatura a la cual se encuentra el gas.

$$\rho = \frac{PMW_a}{ZRT} \quad (\text{Ecuación 4})$$

- **Viscosidad:** Se define como la resistencia de un fluido al flujo y es utilizada en ecuaciones de flujo y dimensionamiento de equipos de proceso. Es una propiedad dinámica ya que solo se puede medir cuando el fluido está en movimiento. La viscosidad es un número que representa las fuerzas de arrastre causadas por las fuerzas de atracción en capas de fluido adyacentes. Se podría considerar como la fricción interna entre moléculas, separada de la que existe entre el fluido y la pared de la tubería. La unidad de viscosidad en la industria del petróleo es el centipoise (cP)<sup>8</sup>.

La viscosidad es calculada por medio de la correlación de Dean-Stiel mostrada a continuación.

$$\mu_g = \mu_1 + \frac{10,8(10^{-5})[EXP(1,439 * \rho_r) - EXP(-1,111 * \rho_r^{1,888})]}{\epsilon_m} \quad (\text{Ecuación 5})$$

---

<sup>8</sup> ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil handling systems and facilities. Op cit.

Donde el cálculo de la densidad reducida y el parámetro de la viscosidad de la mezcla son calculadas por las siguientes ecuaciones.

$$\rho_r = \frac{0,27 * P_{pr}}{Z * T_{pr}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$\varepsilon_m = 5,4402 \frac{T_{pc}^{\frac{1}{6}}}{M_a^{0,5} * P_{pc}^{\frac{2}{3}}} \quad (\text{Ecuación 7})$$

- **Capacidad Calorífica:** La capacidad calorífica del gas es la pendiente de una isobara en la gráfica de entalpía, h vs. temperatura, T. Matemáticamente, esto se expresa mediante la siguiente ecuación<sup>9</sup>.

$$C_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (\text{Ecuación 8})$$

Moshfeghian desarrolló la siguiente correlación generalizada para calcular la capacidad calorífica del gas natural, en función de la temperatura, la presión y la composición.

$$C_p = \left[ ab^T T^c + de^{\left(\frac{P}{1000}\right)} \left(\frac{P}{1000}\right)^f \right] \left(\frac{SG}{0.60}\right)^{0.025} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde SG expresa la gravedad específica del gas y cada constante es dependiente de esta.

---

<sup>9</sup> MOSHFEGHIAN, Mahmood. Variation of Ideal Gas Heat Capacity Ratio with Temperature and Relative Density. [En línea]. July 2009. Disponible en: <http://www.jmccampbell.com/tip-of-the-month/2013/05/variation-of-ideal-gas-heat-capacity-ratio-with-temperature-and-relative-density/>

Tabla 1. Constantes para el cálculo de la capacidad calorífica

Gas SG	a	B	c	d	e	f	Rango T (°F)
0.6	1.1231	1.0057	-0.7351	0.5126	1.1032	0.0161	59-392
0.65	1.9309	1.0068	-0.9104	0.517	1.1075	0.0195	59-392
0.7	1.6987	1.0108	-1.223	0.5506	1.1062	0.0209	68-392
0.75	8.7046	1.0108	-1.4945	0.5437	1.1079	0.025	86-392
0.8	0.0014	1.003	0.4652	0.5372	1.1118	0.0235	104-392

- **Contenido de Agua:** El contenido de agua saturada de un gas depende de la presión, temperatura y composición. El efecto de la composición aumenta con presión y es particularmente importante si el gas contiene CO<sub>2</sub> y/o H<sub>2</sub>S<sup>10</sup>. Para determinar el contenido de agua dulce se utilizó la siguiente correlación.

$$W = \frac{761900.42 * P_{sw}}{P} * \exp\left(\frac{11.81479 * P^{0.92951}}{T}\right) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Para corregir el contenido de agua dulce por los contaminantes que tenga el gas, fue utilizado el siguiente factor de corrección, donde las constantes son dependientes de la presión de operación y el factor X depende de la fracción molar de los contaminantes que el gas contenga.

$$F = a + bX + cX^2 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Finalmente, el factor de corrección de acidez es multiplicado por el contenido de gas dulce calculado en la *ecuación 10*.

$$W_{corregida} = F * W \quad (\text{Ecuación 12})$$

<sup>10</sup> GPSA, Engineering data book. Volume II. Section 20. Oklahoma, 2004. pp. 20-1

## 1.2 DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL

El gas natural es una fuente importante de energía, que en los últimos años ha tenido una notable contribución en la demanda total energética primaria del mundo<sup>11</sup>. Sin embargo, contiene muchas impurezas, de las cuales el contaminante indeseable más común es la humedad. La presencia del vapor de agua en la corriente de gas natural durante el proceso de producción y transporte de este, puede provocar problemas tales como la formación de hidratos que consecuentemente generan obstrucción en la tubería; reducción en la capacidad de transporte debido a la recolección de agua libre y daños en la tubería a causa de los efectos corrosivos del agua, especialmente en la existencia de gases ácidos. Por lo tanto, la presencia del vapor de agua debe eliminarse y mantenerse por debajo de cierto nivel, con el fin de evitar los problemas mencionados anteriormente y cumplir con un requisito de punto de rocío antes de ser comercializado<sup>12</sup>.

En consecuencia, la deshidratación es un proceso fundamental en las facilidades del gas natural, que consiste en eliminar el vapor de agua de una corriente de gas para reducir la temperatura a la que el agua se condensará en la corriente; dicha temperatura se denomina “el punto de rocío” del gas<sup>13</sup>. Entre las diferentes técnicas para deshidratar gas natural se encuentran:

- Absorción utilizando desecantes líquidos
- Adsorción con desecantes sólidos
- Deshidratación con  $\text{CaCl}_2$
- Deshidratación por refrigeración

---

<sup>11</sup> FARAG, Hassan, et al. Natural gas dehydration by desiccant materials. [En línea]. Volumen 50. Alexandria University: Egypt, December, 2011. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.01.020>

<sup>12</sup> ZOU, Changjun, et al. Failure analysis and faults diagnosis of molecular sieve in natural gas dehydration. [En línea]. Volumen 34. ELSEVIER, December 2013. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.07.031>

<sup>13</sup> FARAG, Hassan, et al. Op cit.

- Deshidratación por permeación de la membrana
- Deshidratación por destilación<sup>14</sup>

El enfoque de este trabajo es la deshidratación por adsorción que utiliza desecantes solidos como el tamiz molecular, sílice gel y alúmina, que deben cumplir con ciertas características para obtener una buena remoción del vapor de agua presente en la corriente de gas. Las características de los desecantes son:

- Superficie grande para una alta capacidad.
- Posee "actividad" para que los componentes sean removidos.
- La tasa de transferencia de masa es alta.
- Fácil y económicamente regenerado.
- Buena retención de actividad con el tiempo.
- Pequeña resistencia al flujo de gas.
- Alta resistencia mecánica para resistir la formación de partículas y polvo.
- Barato, no corrosivo, no tóxico, químicamente inerte y posee una alta densidad aparente<sup>15</sup>.

La deshidratación con desecantes solidos es una buena alternativa en aplicaciones como<sup>16</sup>:

- Deshidratación para conseguir puntos de rocío de agua menor que - 40°C a - 50°C [-40 a -58°F], tales como las requeridas en la corriente de entrada de las plantas de extracción de LGN utilizando expansores.

---

<sup>14</sup> GPSA. Op cit.

<sup>15</sup> CAMPBELL, John. Gas conditioning and processing. Volume 2: The equipment modules. [En línea]. Campbell Petroleum Series. U.S.A, 1984. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/122207008/Gas-Conditioning-and-Processing-Volume-2-John-Campbell-Co>

<sup>16</sup> *Ibíd.*

- Unidades de control del punto de rocío de hidrocarburos donde se requiere la extracción simultánea de agua e hidrocarburo para alcanzar ambas especificaciones de venta. Esto se usa frecuentemente para controlar el punto de rocío de hidrocarburos en corrientes de alta presión de gas pobre.
- Deshidratación y remoción simultánea de H<sub>2</sub>S del gas natural.
- Deshidratación de gases que contienen H<sub>2</sub>S donde la solubilidad del H<sub>2</sub>S en glicol puede causar problemas de emisión.
- Deshidratación y remoción de componentes sulfuros (H<sub>2</sub>S, COS, CS<sub>2</sub>, mercaptano) para las corrientes de LGN y GLP.

**1.2.1 Deshidratación con tamices moleculares.** La deshidratación por adsorción o con desecantes solidos utiliza los tamices moleculares ya que estos poseen una alta superficie polar dentro de sus poros, lo cual es una característica única que los distingue de otros adsorbentes disponibles en el mercado, permitiendo así una capacidad de adsorción extremadamente alta para el vapor de agua y otros componentes polares incluso en concentraciones muy bajas<sup>17</sup>, por tal motivo este tipo de desecante solido fue el escogido para el desarrollo del proyecto.

**1.2.1.1 Principales fenómenos físicos.** Durante el proceso de deshidratación con tamices moleculares se encuentran presentes los siguientes fenómenos físicos:

- **Adsorción:** La adsorción es un fenómeno físico que describe cualquier proceso en el que las moléculas del gas entran en contacto con una superficie sólida y algunas se condensan en la superficie<sup>18</sup>. Existen dos tipos de adsorción, la

---

<sup>17</sup> FARAG, Hassan, et al. Op cit.

<sup>18</sup> ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of gas-handling systems and facilities. [En línea]. Volume 2. Gulf Professional Publishing Elsevier. Houston, Texas, 1999, p.231. Disponible en:

adsorción física o fisisorción que implica una forma de adhesión entre la superficie del tamiz molecular y las moléculas de agua, las cuales debido a las fuerzas de atracción de van der Waals forman una película delgada que se mantiene sobre el área del desecante<sup>19</sup>. Por otra parte, se encuentra la adsorción química la cual tiene una aplicación limitada en el procesamiento de gas natural y, por tanto, no será tomada en cuenta en este trabajo.

- **Desorción:** Es el fenómeno en el cual la molécula de agua por la aplicación de calor o por el desplazamiento con otro material que se adsorbe con mayor fuerza, deja el cristal del tamiz molecular en el mismo estado químico que cuando entró<sup>20</sup>.

**1.2.1.2 Propiedades del tamiz molecular.** Los tamices moleculares son aluminosilicatos o zeolitas con una forma cristalina, que tienen una estructura de interconexión tridimensional uniforme de alúmina y tetraedros de sílice. Estos cristales de zeolita son fabricados con tamaños de poros específicos de manera que sea muy selectivo a el tipo de molécula que adsorbe, ésta debe ser de afinación polar y con la dimensión apropiada de modo que corresponda a los poros presentes en un tipo dado de tamiz molecular<sup>21</sup>.

Comúnmente en el procesamiento de gas se encuentran disponibles dos tipos de tamices moleculares, el tipo A consta de una estructura cúbica simple<sup>22</sup> con huecos intra-cristalinos donde ocurre toda la adsorción. El tipo X, tiene la

---

[http://www.boti.oil.gov.iq/book/english%20ebooks/%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7%20%D9%88%D8%A7%D9%84%D8%AC%D9%8A%D9%84%D9%88%D8%AC%D9%8A%D8%A7/-%20Surface%20Production%20Operations%20\(Volumen%202,%202nd%20Ed\).pdf](http://www.boti.oil.gov.iq/book/english%20ebooks/%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7%20%D9%88%D8%A7%D9%84%D8%AC%D9%8A%D9%84%D9%88%D8%AC%D9%8A%D8%A7/-%20Surface%20Production%20Operations%20(Volumen%202,%202nd%20Ed).pdf)

<sup>19</sup> THOMPSON, Richard & MANNING, Francis. Oilfield Processing of Petroleum. [En línea]. Pennwell Publishing Company. Tulsa, Oklahoma, 1991. p. 172. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=FnDp8V9TX9oC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=FnDp8V9TX9oC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

<sup>20</sup> TUDOR, Thomas. Molecular sieves in petroleum and natural gas processing. [En línea]. World Petroleum Congress: Germany, 1963. [Consultado el 30 de octubre de 2017]. Disponible en: <https://www.onepetro.org/conference-paper/WPC-10211>

<sup>21</sup> GAS PROCESSING & LNG. Proper regeneration of molecular sieves in TSA processes-Part 1. [En línea]. Gulf Publishing Holdings LLC. 2018. [Consultado el 17 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://gasprocessingnews.com/features/201802/proper-regeneration-of-molecular-sieves-in-tsa-processes%E2%80%94part-1.aspx>

<sup>22</sup> THOMPSON, Richard & MANNING, Francis. Op cit, p.172.

posibilidad de adsorber todas las moléculas adsorbidas por el tipo A con una capacidad algo mayor, debido a su estructura tetraédrica. El diámetro máximo de las moléculas que pueden entrar en las diferentes estructuras y ser adsorbidas son las siguientes:

Tabla 2. Máximo diámetro molecular adsorbido por los tipos de zeolitas

Tipo	Diámetro Molecular (Å)
3A- Zeolita de potasio	3
4A- Zeolita de sodio	4
5A- Zeolita de calcio	5
10X- Zeolita de calcio	8
13A- Zeolita de sodio	10

Fuente: CAMPBELL, John. Gas conditioning and processing. Volume 2: The equipment modules. [En línea]. Campbell Petroleum Series. U.S.A, 1984. p.398. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/122207008/Gas-Conditioning-and-Processing-Volume-2-John-Campbell-Co>

De los tipos de tamices moleculares presentados en la *tabla 2*, la zeolita de potasio y de sodio correspondientes al tipo 3A y 4A respectivamente, son las implementadas en la deshidratación de gas natural. Algunas de las propiedades más importantes a destacar de estos desecantes se muestran en la *tabla 4*. Igualmente, se encuentran disponibles en la industria dos formas de zeolitas y cada una de ellas en diámetros diferentes como se muestran a continuación:

Tabla 3. Formas y tamaños disponibles de zeolitas

Forma	Diámetro (in)
Esferas	1/8
	1/16
Cilindros extruidos	1/8
	1/16

Tabla 4. Propiedades típicas del tamiz molecular.

Propiedad	Tamiz molecular 4A-5A
Área superficial ( $ft^2/lbm$ )	3175250-3908000
Volumen poroso ( $in^3/lbm$ )	7.479
Diámetro de poro (Å)	Ver nota
Densidad aparente ( $lbm/ft^3$ )	42.9936-44.9904
Capacidad calorífica ( $BTU/(lbm - ^\circ F)$ )	0.239
Nota: Los tipos 4A y 5A contienen cavidades de 11.4 Å de diámetro con aberturas circulares de 4.2 Å de diámetro (tamaño de abertura para adsorción).	

Fuente: CAMPBELL, John. Gas conditioning and processing. Volume 2: The equipment modules. [En línea]. Campbell Petroleum Series. U.S.A, 1984. p.396. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/122207008/Gas-Conditioning-and-Processing-Volume-2-John-Campbell-Co>

Por otra parte, los tamices moleculares en comparación con los demás desecantes sólidos son menos dependientes de la temperatura y la humedad relativa, por lo tanto, su capacidad de adsorción se ve menos afectada<sup>23</sup>. Además, es el desecante sólido que alcanza el punto de rocío más bajo de  $-150^\circ F$  y pueden reducir el contenido de agua a la salida de gas a menos de 0.1 ppmv<sup>24</sup>, por consiguiente, se usa comúnmente antes de las plantas criogénicas de NGL diseñadas para recuperar el etano, ya que, producen temperaturas muy frías y requieren un gas de alimentación bastante seco para evitar la formación de hidratos<sup>25</sup>. Finalmente, una gran ventaja de estos desecantes sólidos es que pueden regenerarse, lo que reduce la cantidad requerida de tamiz molecular a cantidades económicamente viables<sup>26</sup>.

**1.2.1.3 Descripción del proceso básico.** Un sistema básico de deshidratación con tamices moleculares consta de dos torres que contienen desecante sólido

<sup>23</sup> LYONS, William. Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering. [En línea]. Gulf Publishing Company. Volumen 2.1996. p. 792. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-643-7.X5007-9>

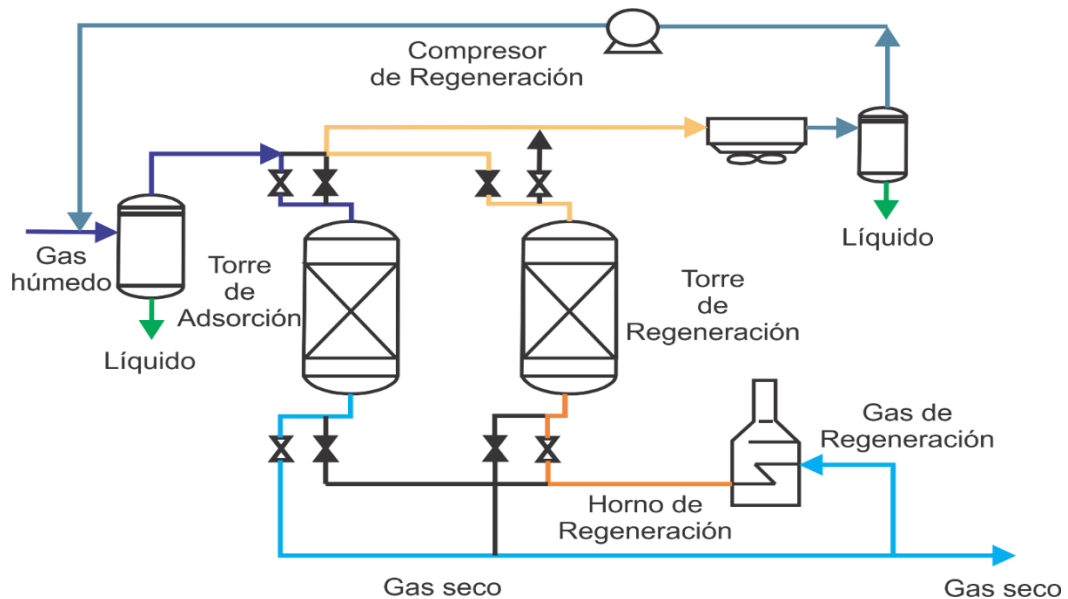
<sup>24</sup> ALMAKRAMI, Eisa; GADI, Amr. Optimizing Dehydrators Operation Using Dynamic Adsorption time. [En línea]. International Petroleum Technology Conference. One Petro. Beijing, China, 2013. Disponible en: <https://doi.org/10.2523/IPTC-16621-Abstract>

<sup>25</sup> LYONS, William. Op cit, p. 792.

<sup>26</sup> HEROLD, Ruud & MOKHATAB, Saeid. Optimal design and operation of molecular sieves for gas dehydration - Part 2. [En línea]. Gas Processing. Gulf Publishing Company. 2017. [Consultado el 18 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.gasprocessingnews.com/features/201710/optimal-design-and-operation-of-molecular-sieves-for-gas-dehydration%E2%80%94part-2.aspx>

como se muestra en la *figura 1*. Una de las torres realiza el proceso de adsorción mientras la otra está en regeneración, donde este último se subdivide en un ciclo calentamiento y enfriamiento. Para el proceso de calentamiento se utiliza parte del gas seco, que es calentado entre 400-600°F<sup>27</sup>, con el fin de expulsar el agua adsorbida por el desecante; después la torre se enfría con una corriente de gas sin calentar, este ciclo de enfriamiento acaba cuando la temperatura del lecho está entre 18-27°F<sup>28</sup> más alta que la temperatura de gas de entrada al sistema. Las torres se cambian de adsorción a regeneración y viceversa, antes de que la torre en adsorción se sature completamente de agua como se muestra en la *figura 2*, donde la parte sombreada en la torre 1 representan la zona del desecante saturado con agua. Cuando el frente del lecho 1 alcance la salida, este cambiará a regeneración, y el lecho 2 estará en adsorción. En el momento en que 2 esté listo para la regeneración, el lecho 1 debe estar listo para volver a la corriente y así continuará el ciclo.

Figura 1. Sistema básico de dos torres con tamiz molecular.

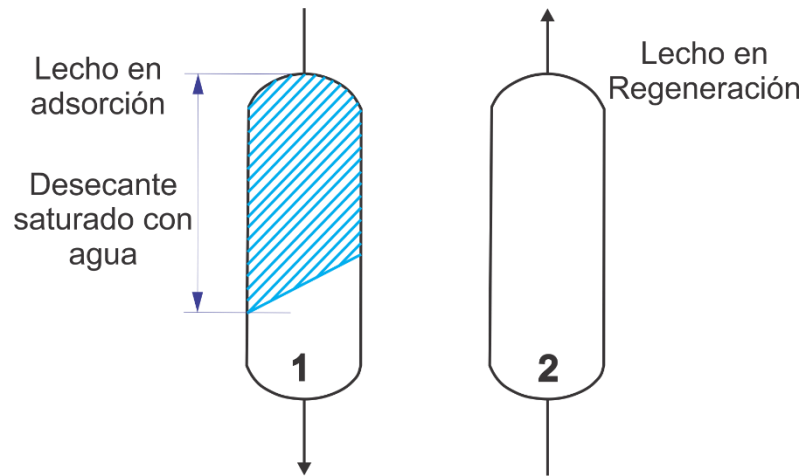


Fuente: GPSA, Engineering data book. Volume II. Section 20. Oklahoma, 2004. pp.20-40.

<sup>27</sup> ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of gas-handling systems and facilities. Op cit., p.231.

<sup>28</sup> CAMPBELL, John. Op cit.

Figura 2. Operación de las torres en adsorción y regeneración.



Fuente: CAMPBELL, John. Gas conditioning and processing. Volume 2: The equipment modules. [En línea]. Campbell Petroleum Series. U.S.A, 1984. p.401. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/122207008/Gas-Conditioning-and-Processing-Volume-2-John-Campbell-Co>

En la deshidratación del gas natural el flujo de adsorción es casi siempre hacia abajo debido a la velocidad más alta permitida en esta dirección. La tasa de gas de regeneración que es generalmente alrededor del 10% del flujo de alimentación<sup>29</sup>, fluye de forma ascendente debido a que la mayor parte de la contaminación del lecho ocurre en la parte superior y el vapor producido desde la parte inferior del lecho ayuda a eliminarla, prolongando así la vida útil del desecante.

Durante el proceso de regeneración se debe proporcionar el calor sensible suficiente para calentar toda la torre y el lecho, además se debe suministrar el calor necesario para evaporar el agua y romper las fuerzas de atracción entre las moléculas de esta y el desecante. Por tal motivo, el tiempo del ciclo de calentamiento es mayor debido a que este se encarga de proveer el calor de

<sup>29</sup> HEROLD, Ruud & MOKHATAB, Saeid. Optimal design and operation of molecular sieve gas dehydration units - Part 1. [En línea]. Gas Processing, Gulf Publishing Holdings LLC. Nova Scotia, Canada, 2017. [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: <http://gasprocessingnews.com/features/201708/optimal-design-and-operation-of-molecular-sieve-gas-dehydration-units%E2%80%94part-1.aspx>

desorción del agua, mientras que en el ciclo de enfriamiento solo interviene el calor sensible<sup>30</sup>.

Es importante conocer la forma adecuada de realizar el proceso de calentamiento del lecho, puesto que un mal procedimiento puede causar la desactivación o daño del tamiz. Como ya fue mencionado anteriormente, el gas seco caliente se pasa hacia arriba a través del lecho del tamiz molecular y el agua se evapora. Si al iniciar el calentamiento este gas está a una temperatura alta, el agua que ha sido evaporada de la parte inferior del lecho se transportaría a la parte superior, que aún no habría sido calentada por el gas de regeneración, por lo tanto, el lecho aún estaría frío y saturado, provocando que el agua eliminada de la parte inferior del lecho pueda condensarse para formar agua líquida, generando que el aglomerante de la arcilla del tamiz molecular se disuelva y establezca una obstrucción en la etapa de regeneración. Con el fin de evitar este problema, se debe calentar el lecho lentamente para que la parte superior pueda tener una etapa de precalentamiento y así, en el momento que esta entre en contacto con el agua eliminada de la parte inferior no se genere la condensación del agua líquida<sup>31</sup>.

Para el diseño de las torres y el óptimo funcionamiento del sistema, se debe tener en cuenta en primer lugar, el contenido de agua en la corriente de gas de entrada, dado que a una mayor carga de agua se requiere un lecho de mayor tamaño, mayores cargas de calefacción y refrigeración y una mayor tasa de gas de regeneración<sup>32</sup>. En segundo lugar, es necesario conocer que, si se aumenta el caudal y el contenido de agua presente en el gas de entrada, disminuye el porcentaje de eliminación de vapor de agua<sup>33</sup>. Finalmente, como la capacidad del

---

<sup>30</sup> CAMPBELL, John. Op cit.

<sup>31</sup> HEROLD, Ruud & MOKHATAB, Saeid. Optimal design and operation of molecular sieve gas dehydration units - Part 1. Op cit.

<sup>32</sup> MOSHFEGHIAN, Mahmood. ¿What is the impact of feed gas conditions on the adsorption dehydration system?. [En línea]. PetroSkills. 2015 [Consultado el 10 de mayo de 2018 ]. Disponible en: <https://www.petroskills.com/blog/entry/what-is-the-impact-of-feed-gas-conditions-on-the-adsorption-dehydration-system#.W7amhGhKjIU>

<sup>33</sup> FARAG, Hassan, et al. Op cit.

lecho disminuye en función del número de ciclos de regeneración, un importante criterio de diseño es la vida útil requerida, es decir, cuánto debe durar el lecho antes de que se requiera un cambio. En general, los lechos de tamices moleculares se cambian durante una parada importante de la planta. La vida útil de los desecantes es de 750 ciclos, lo que equivale a casi 3 años con una carga de gas normal<sup>34</sup>.

---

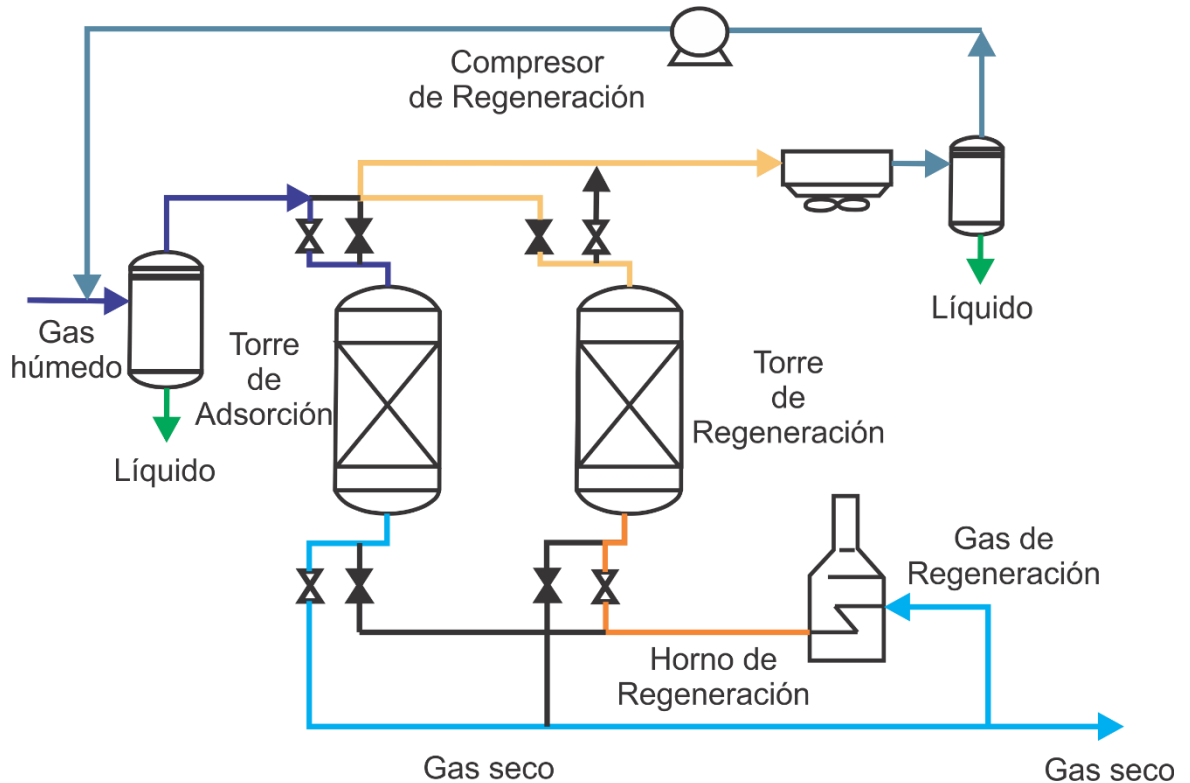
<sup>34</sup> MOHAMMED, Al-Khamis & AHMED, Al-Harbi. A Success Story: Extending Molecular sieve life by double. International Petroleum Technology Conference. Dubai, December 2007.

## 2. SISTEMA DE DESHIDRATACIÓN DEL GAS CON TAMICES MOLECULARES

La *figura 3* muestra una unidad típica de tamiz molecular, donde la corriente de gas húmedo de entrada pasa a través de un Scrubber para eliminar todo el líquido y las impurezas sólidas antes de ingresar a la torre de adsorción. En la torre, el gas húmedo entra en contacto con el lecho de desecante sólido, el cual adsorbe el vapor de agua hasta alcanzarse un equilibrio entre los dos; en general, solo se requieren unos pocos segundos para lograr una completa adsorción. El gas natural seco sale del lecho, y finalmente abandona la unidad de deshidratación sólida.

Si el gas húmedo continúa fluyendo en el lecho de adsorción, todo el desecante sólido eventualmente va a saturarse con agua, y el gas húmedo no podría ser deshidratado. Por esta razón, la torre que se encuentra en adsorción debe pasar a regenerar el tamiz molecular antes de saturarse completamente. Aproximadamente, un 10% del gas ya deshidratado se calienta de 400-600°F en un horno y posteriormente entra a la torre para contactar y calentar el lecho, con el fin de evaporar el agua anteriormente adsorbida y transportarla fuera de la torre al Aero-enfriador. Cuando este gas de regeneración se enfría, la mayor parte del vapor de agua se condensa y se elimina en el separador de regeneración o scrubber. Finalmente, el gas de regeneración se dirige hacia un compresor que suministra la presión que se ha perdido durante el proceso antes de volver a la corriente de entrada. Una vez que se ha evaporado y eliminado de la torre toda el agua del lecho, este debe ser enfriado para así volver a ser utilizado en el ciclo de adsorción.

Figura 3. Sistema de deshidratación con tamices moleculares.



Fuente: LYONS, William. Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering. [En línea]. Gulf Publishing Company. Volumen 2. 1996. p. 793. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-643-7.X5007-9>

## 2.1 EQUIPOS INDIVIDUALES

Dentro de los componentes esenciales de cualquier sistema de deshidratación con tamices moleculares se encuentran<sup>35</sup>:

- Separador de gas de entrada.
- Dos o más torres de adsorción llenas del desecante sólido
- Un calentador de alta temperatura

<sup>35</sup> ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of gas-handling systems and facilities. Op cit., p.229.

- Un enfriador de gas de regeneración
- Un separador de gas de regeneración
- Un compresor
- Tuberías, válvulas de conmutación para dirigir y controlar el flujo de gases de acuerdo con los requisitos del proceso.

En esta sección se muestra más a detalle la función e importancia que cumple cada uno de los equipos nombrados anteriormente y un breve diseño de estos.

**2.1.1 Separador o Scrubber.** Durante el proceso se utilizan dos scrubber, el primero de estos al inicio donde es absolutamente necesario eliminar de la corriente de gas los hidrocarburos líquidos, el agua libre y otras impurezas, para proteger el desecante. El agua y otros líquidos libres pueden dañar el lecho causando su rotura y pulverización. Los líquidos no volátiles recubren el desecante lo que conlleva al bloqueo de los poros, reduciendo así la capacidad. Los sólidos pueden obstruir el lecho, y la mayor caída de presión resultante puede afectar las partículas desecantes. Se debe usar un separador o coalescente de tipo filtro cuando se encuentre aguas abajo de una unidad de amina o compresor <sup>36</sup>. El segundo scrubber es el de regeneración, que se utiliza para separar el agua condensada durante el enfriamiento del gas en el Aero-enfriador; el gas de regeneración frío y saturado se recicla para deshidratarse, lo cual se puede hacer comprimiendo este.

- **Metodología:** El diseño incluye el tamaño, diámetro del scrubber y de las boquillas tanto de entrada como de salida de este. Inicialmente se debe escoger el factor Sourder-Brown ( $K_s$ ), que depende del tipo de extractor de niebla seleccionado. Este factor es necesario para determinar la velocidad del gas permitida, la cual es fundamental en el cálculo del área de la sección

---

<sup>36</sup> THOMPSON, Richard & MANNING, Francis. Op cit., p.176.

transversal del scrubber. Tanto la velocidad y el área son indispensables en la determinación del diámetro interno del separador.

Tabla 5. Factor Ks para cada tipo de extractor de niebla.

Tipo	Ks (ft/s)
High-Efficiency Mesh Pad	0.2
High-Capacity Mesh Pad	0.4
Standard Mesh Pad	0.35
Up-flow Simple Vane	0.5
Horizontal Simple Vane	0.65
Up-flow High-Capacity Vane	0.82
Horizontal High-Capacity Vane	0.82
Axial-Flow Cyclone	0.8

Fuente: Adaptado de BOTHAMALEY, Mark. Gas-Liquid Separators: Quantifying separation performance part 2. [En línea]. Oil and Gas Facilities. October, 2013. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/274747519\\_GasLiquids\\_Separators\\_Quantifying\\_Separation\\_Performance\\_-\\_Part\\_2](https://www.researchgate.net/publication/274747519_GasLiquids_Separators_Quantifying_Separation_Performance_-_Part_2)

- **Velocidad del gas permitida (ft/s)**

$$V = K_s \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

- **Área transversal (ft<sup>2</sup>)**

$$A = \frac{q_a}{V} \quad (\text{Ecuación 14})$$

- **Diámetro interno del Scrubber (ft)**

$$ID = \left( \frac{A}{0.7854} \right)^{0.5} \quad (\text{Ecuación 15})$$

- **Velocidad del fluido:** Una vez realizado el paso anterior, lo siguiente es hallar la velocidad de cada fluido, con el fin de calcular el diámetro de las boquillas de entrada y salida del gas, y la de la salida del líquido.

$$V = \frac{A}{\rho^{0.5}} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Si se está hallando la velocidad en la boquilla de entrada, la densidad será la de la mezcla y la densidad del gas se utilizará en la boquilla de salida de este. En el caso de la velocidad del líquido, están establecidos los siguientes tres valores: 3, 3.5 y 4 ft/s, sin embargo, generalmente 3.5 ft/s es la más utilizada. Por otra parte, el valor de A en el caso de la velocidad de la boquilla de entrada es de 32 y 60 para la velocidad en la boquilla de salida del gas.

- **Diámetro interno de las boquillas:** Si se realiza el cálculo del diámetro de la boquilla de entrada, se utiliza el caudal y la velocidad de la mezcla, e igualmente para las otras dos boquillas, es decir, si es la boquilla de salida del gas, en la *ecuación 17* se reemplaza el caudal y la velocidad por la del gas y si es la del líquido, el caudal y velocidad de este.

$$D_{in} = \sqrt{\frac{4q}{\pi V}} \quad (\text{Ecuación 17})$$

**2.1.2 Horno o calentador.** Se utiliza un calentador directo debido a las temperaturas tan altas (400-550°F) que deben suministrarse al gas de regeneración, para reactivar el desecante de las torres después de haber pasado por el proceso de adsorción. El tamaño insuficiente del calentador da como

resultado una regeneración incompleta y, por lo tanto, reduce el rendimiento de toda la unidad<sup>37</sup>.

- **Metodología:** Inicialmente se determina el calor o Dutty para calentar el gas de regeneración con la *ecuación 18*, del cual el 75% pertenece al calor de radiación y el restante al de convección.

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T \quad (\text{Ecuación 18})$$

Una vez hallado el caudal de radiación este es dividido en el flux radiante generalmente de 10000 BTU/h\* $\text{ft}^2$ , con el fin de determinar el área de transferencia de calor ( $A_{sr}$ ).

- **Longitud total de la tubería:** La longitud es calculada utilizando el área de transferencia de calor hallado anteriormente.

$$L_t = \frac{A_{sr}}{(12 * \pi * d_o)/144} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Posteriormente, es necesario calcular la longitud individual de la tubería ( $L_{tub}$ ) dividiendo el valor de la *ecuación 19* y el número de tubos (n), el cual se asume y más adelante se verifica si esta suposición es correcta.

- **Diámetro del horno:** Es necesario conocer el espaciamiento de centro a centro entre los tubos (x), que es determinado con la *tabla 5* de la NORMA API STANDARD 560.

---

<sup>37</sup> ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. Surface Production Operations: Design of gas-handling systems and facilities. Op cit., p.229.

$$D_h = \frac{x * n}{\pi} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Después de calcular el diámetro, se procede a determinar la relación de esbeltez del horno que debe ser menor a 2.7. Si la relación entre la longitud individual de la tubería y el diámetro del horno excede dicho valor, es necesario aumentar el número de tubos y realizar de nuevo los cálculos hasta cumplir con la condición.

- **Masa de gas combustible:** Finalmente, se calcula la cantidad de gas necesario como combustible para el calentamiento del gas de regeneración en Lbm/MMBtu

$$G_{fi} = 822 + 7.78 * E_a \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde  $E_a$  es el exceso de aire.

Con la ecuación 22 se obtiene la masa de gas combustible, para la cual es necesario la eficiencia del horno (E).

$$G_f = G_{fi} * \frac{Q}{E} \quad (\text{Ecuación 22})$$

**2.1.3 Aero-enfriador.** Este equipo se utiliza con el objetivo de disminuir la temperatura del gas de regeneración caliente y condensar el agua presente en esa corriente. El aire, agua o gas natural pueden ser utilizados en la refrigeración, sin embargo, el aire ambiente es generalmente implementado para enfriar la corriente de regeneración. Además, se debe tener en cuenta, que en climas fríos el enfriamiento no debe ser excesivo, dado que pueden formarse líquidos libres

(agua y/o HC) cuando el gas de regeneración sobre-enfriado se recicla y se mezcla con el gas de alimentación húmedo<sup>38</sup>.

- **Metodología:** Los parámetros de operación del aero-enfriador y la geometría de este, son calculados por medio de iteraciones realizadas con base en el factor R y P.

- **Factor R y P**

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (\text{Ecuación 23})$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde  $t_2$  y  $t_1$  corresponden a las temperaturas de salida y entrada del gas respectivamente;  $T_1$  y  $T_2$  a las temperaturas de entrada y salida del gas.

- **Temperatura media logarítmica**

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad (\text{Ecuación 25})$$

- **Temperatura de salida del aire**

$$t_2 = t_1 + \frac{Q}{\dot{m} * C_{paire}} \quad (\text{Ecuación 26})$$

---

<sup>38</sup> THOMPSON, Richard & MANNING, Francis. Op cit., p. 177.

**2.1.4 Compresor.** Es utilizado para suministrar el aumento de presión al gas de regeneración que se pierde durante la deshidratación, el cual es típicamente de 40-50 psi<sup>39</sup>. Este equipo no es necesario si se utiliza gas húmedo para regenerar el tamiz, sin embargo, esto causa que los contaminantes líquidos entren en contacto con las partículas sólidas de desecante en el fondo del lecho, llegando a generar la contaminación de este.

- **Metodología:** El diseño del compresor en el sistema de deshidratación con tamices moleculares se inicia calculando la relación de calores específicos, posteriormente la temperatura de descarga y finalmente la potencia del compresor.

- **Relación de calores específicos**

$$k = 1.3 - (0.31)(\gamma_g - 0.55) \quad (\text{Ecuación 27})$$

- **Temperatura de descarga:** Una vez realizado el paso anterior, se calcula la temperatura de descarga del compresor, donde se necesita la presión de descarga ( $P_2$ ), presión de entrada ( $P_1$ ) y la Eficiencia isentrópica.

$$T_D = T_1 \left[ 1 + \frac{\left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}{E_{isen}} \right] \quad (\text{Ecuación 28})$$

- **Potencia del compresor:** Finalmente es calculada la potencia, donde se necesita el caudal del gas, presión de entrada y salida, relación de calores

---

<sup>39</sup> *Ibíd.*

específicos, factor de compresibilidad y la eficiencia global del compresor, la cual es hallada con la *ecuación 29*.

$$HP = 3.03 * \frac{Q_g T_1}{E} \left( \frac{Z_1 + Z_2}{2} \right) \left( \frac{k}{k-1} \right) \left( \frac{P_{sc}}{T_{sc}} \right) \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (\text{Ecuación 29})$$

$$E = E_{isentrópica} * E_{mecánica} \quad (\text{Ecuación 30})$$

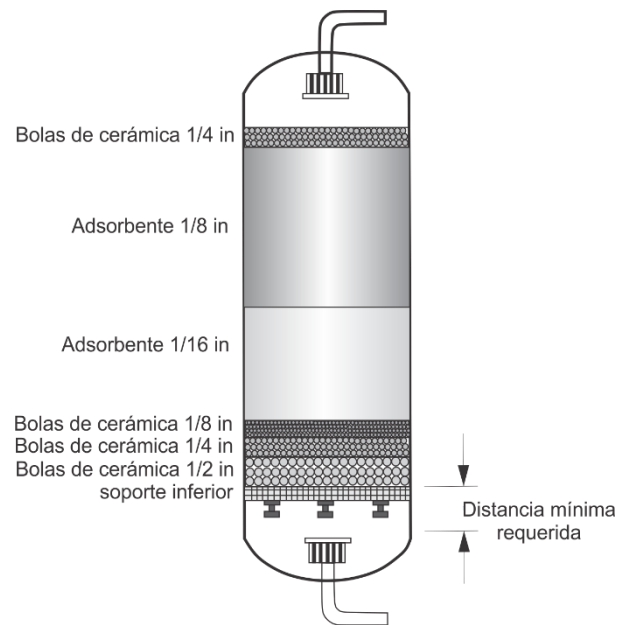
Los valores de eficiencia isentrópica oscilan entre 0.65-0.85 y la eficiencia mecánica generalmente es del 95%<sup>40</sup>.

**2.1.5 Torre de adsorción.** El diseño típico de una torre de adsorción requiere cierta distancia en la parte inferior del distribuidor de entrada, y la parte superior del lecho para garantizar la presión y distribución del flujo. Debido a que el flujo es invertido durante la regeneración, se requiere la misma condición para la parte inferior del lecho. Como se muestra en la *figura 4*, la diferencia de tamaño entre las capas de cerámica no excede un factor de 2, puesto que de esta forma disminuyen las posibilidades de que las partículas más pequeñas migren entre las partículas más grandes. Si las partículas llegarán a migrar se crearía un canal preferencial para la deshidratación del gas, el cual generaría un agotamiento rápidamente del tamiz, debido a que la mayor parte de flujo se mueve a través de él<sup>41</sup>.

<sup>40</sup> CAMPBELL, John. Op cit., p. 396.

<sup>41</sup> HEROLD, Ruud & MOKHATAB, Saeid. Optimal design and operation of molecular sieve gas dehydration units - Part 1. Op cit.

Figura 4. Torre de adsorción típica.



Fuente: HEROLD, Ruud & MOKHATAB, Saeid. Optimal design and operation of molecular sieve gas dehydration units-Part 1. pp 6. Gulf Publishing Holdings LLC

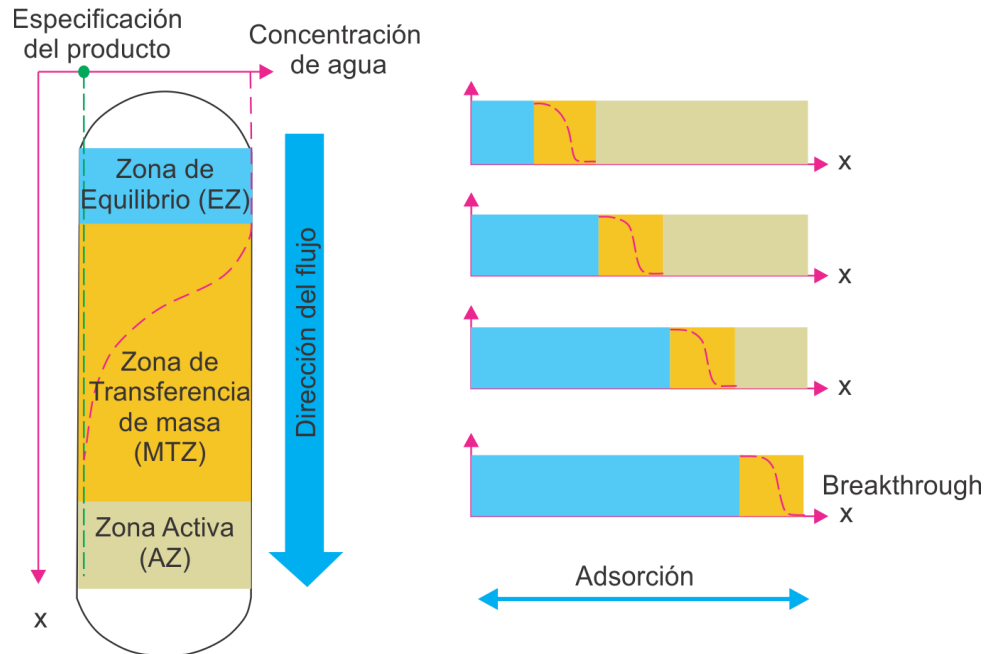
## 2.2 DISEÑO DE ADSORCIÓN

Durante el ciclo de adsorción se encuentran tres zonas en el lecho, como se muestra en la *figura 5*, además se ilustra la saturación de agua que se mueve a través del lecho como un frente a lo largo de la dirección axial ( $x$ ). La primera es la zona de equilibrio (EZ), donde el adsorbente está en equilibrio con el fluido del proceso, en otras palabras, está saturado con agua a las condiciones del gas de entrada y no tiene capacidad adicional para seguir adsorbiendo. La siguiente zona es la de transferencia de masa (MTZ) donde ocurre la adsorción, el MTZ muestra un gradiente de la concentración de agua, que disminuye a una especificación de salida requerida y se puede definir como la longitud requerida para que el adsorbente lleve el agua de su concentración inicial a la especificación final.

Delante de la zona MTZ, el sólido está seco, conocido como zona activa (AZ) que, durante un tiempo de adsorción dado, no ha estado en contacto con el agua<sup>42</sup>.

Cuando el borde delantero del MTZ llega al final del lecho, se produce el llamado avance o desbordamiento, el cual se caracteriza por el hecho de que el gas llega al final del lecho con un contenido de agua por encima de la especificación. Si el proceso continúa durante bastante tiempo, ninguna cantidad efectiva permanecerá en el lecho<sup>43</sup>.

Figura 5. Progreso de la zona de transferencia de masa (MTZ) a través del lecho para el avance.



Fuente: SANTOS, Myrlla, et al. Natural gas dehydration by molecular sieve in offshore plants: Impact of increasing carbon dioxide content. [En línea]. Volumen 149. Energy Conversion and Management. October 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.005>

<sup>42</sup> GAS PROCESSING & LNG. Op cit.

<sup>43</sup> CAMPBELL, John. Op cit., p. 404.

**2.2.1 Metodología de cálculo.** Es necesario mencionar que la mayor parte de los datos y cálculos utilizados para el diseño de adsorción y regeneración, se realizan con base en la metodología de DESHIDRATACIÓN POR ADSORCIÓN DE JHON CAMPBELL.

Inicialmente se de establecer el tipo de partícula (*Ver tabla 3*); el tiempo de adsorción que se encuentra en un rango de 8-16 horas cuando el gas de alimentación está saturado con agua, si este ha sido pasado por una unidad de glicol el tiempo recomendado es de 24-30 horas y finalmente el número de lechos a utilizar, este parámetro va a depender del caudal de gas, si es menor a 50 MMSCFD se recomienda seleccionar 2 torres, de lo contrario 3 o más torres pueden ser escogidas para el diseño. Posteriormente, se calcula la velocidad superficial del gas<sup>44</sup>.

- **Velocidad superficial del gas:** Antes de estimar la velocidad es necesario calcular el diámetro mínimo del lecho y la velocidad máxima del gas. Estos cálculos se hallan con la metodología propuesta en GPSA Engineering data book gas processing, sección 20.

$$V_g = V_{max} \left( \frac{D_{minimo}}{D_{seleccionado}} \right)^2 \quad (\text{Ecuación 31})$$

- **Diámetro mínimo**

$$D_{minimo} = \left( \frac{4q}{\pi V_{max}} \right)^{0.5} \quad (\text{Ecuación 32})$$

---

<sup>44</sup> *Ibíd.*

Donde,

$$q = \frac{\dot{m}}{60\rho} \quad (\text{Ecuación 33})$$

- **Velocidad máxima del gas:** El valor de  $\Delta P/L$  depende del tipo, tamaño y forma de la partícula del tamiz molecular, pero para la ecuación 34 se utiliza el valor máximo permitido de 0.33 psi/ft<sup>45</sup>.

$$V_{max} = \left[ \frac{(\Delta P/L)_{max}}{(C\rho)} \right]^{1/2} - \left[ \frac{(B/C)(\mu/\rho)}{2} \right] \quad (\text{Ecuación 34})$$

En la *tabla 6* se muestran las constantes B y C que dependen del tipo de partícula.

Tabla 6. Constantes B y C

Tipo de partícula	B	C
1/8" esfera	0.0560	0.0000889
1/8" cilindros extruidos	0.0722	0.000124
1/16" esfera	0.152	0.000136
1/16" cilindros extruidos	0.238	0.000210

Fuente: LYONS, William. Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering. [En línea]. Gulf Publishing Company. Volumen 2.1996. p. 793. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-643-7.X5007-9>

- **Flujo actual del gas:** Donde  $q_s$  es la relación entre el caudal del gas y el número de lechos en adsorción.

$$q_a = \frac{q_s}{1440} \left( \frac{P_s}{P} \right) \left( \frac{P}{T_s} \right) Z \quad (\text{Ecuación 35})$$

<sup>45</sup> GPSA. Op cit., pp.20-38

- **Diámetro de la torre**

$$d = \sqrt{\frac{4q_a}{\pi V_g}} \quad (\text{Ecuación 36})$$

- **Carga de agua por ciclo:** Es necesario conocer el tiempo del ciclo de adsorción ( $\theta_B$ ) y el contenido de agua presente en el gas a deshidratar ( $W$ ).

$$m_w = \frac{\theta_B q_s W}{24} \quad (\text{Ecuación 37})$$

- **Altura del lecho:** Una vez realizado el cálculo anterior es posible determinar la altura del lecho, la cual depende no solo de la carga de agua por ciclo, sino también del diámetro de la torre, la densidad aparente y capacidad útil del desecante que inicialmente se asume del 10% y posteriormente se calcula.

$$h_B = \frac{400m_w}{\pi x \rho_B d^2} \quad (\text{Ecuación 38})$$

La relación entre la altura del lecho y el diámetro de la torre de estar entre 2.5 y 6. Un valor inferior a 2.5 puede resultar en una menor capacidad de desecación útil debido a la proporción relativamente grande de MTZ/ $h_B$ . Un valor mayor que 6 puede dar lugar a  $\Delta P$  excesivo<sup>46</sup>.

- **Caída de presión:** Todos los cálculos realizados anteriormente son con el fin de poder determinar la caída de presión por unidad de longitud y posteriormente esta es multiplicada con la altura del lecho y así hallar el delta de presión para verificar si entra en el rango permisible.

---

<sup>46</sup> CAMPBELL, John. Op cit., p. 413.

$$\frac{\Delta P}{L} = B\mu V_g + C\rho_g V_g^2 \quad (\text{Ecuación 39})$$

La caída de presión de diseño en todo el lecho debe ser de aproximadamente 5 psi y no se recomiendan valores superiores a 8 psi<sup>47</sup>. Si este llegará a ser el caso y el lecho es demasiado corto, se debe aumentar el tiempo del ciclo o el número de lechos; si el lecho es largo se realiza lo contrario.

- **Longitud zona de transferencia de masa (MTZ):** Los factores que afectan la longitud del MTZ incluyen la velocidad del gas, contaminantes, contenido de agua y saturación relativa del gas de entrada. Los contaminantes pueden retrasar el proceso de transferencia de masa (aumentar la longitud de MTZ) generando resistencia a la adsorción.

$$h_z = A \left[ \frac{(Q_g)^{0.2389} (W)^{0.7895} (RH)^{0.5249}}{d^{0.4778}} \right] \left[ \frac{P}{TZ} \right]^{0.5506} F_m \quad (\text{Ecuación 40})$$

El valor de la constante A es de 0.165 y resultado obtenido de la *ecuación 40* debe ser multiplicado por 0.6 en el caso de tamices moleculares. Por otra parte, se asume que el gas a deshidratar estará saturado con agua, es decir 100% de RH.

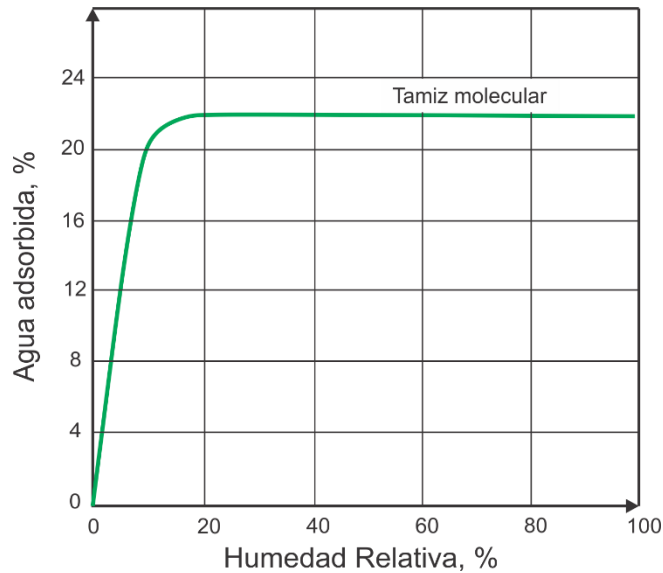
Por último, antes de poder calcular la capacidad útil del desecante, es necesario tener claro los siguientes tres conceptos<sup>48</sup>:

- **Capacidad estática:** La capacidad de agua de un desecante nuevo, determinado sin flujo de fluido. La capacidad del tamiz molecular se muestra en la *figura 6*, que es aproximadamente del 22%.

<sup>47</sup> ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. Surface Production Operations: Design of gas-handling systems and facilities. Op cit., p.235.

<sup>48</sup> CAMPBELL, John. Op cit., pp 405-406.

Figura 6. Curva de equilibrio estática para el tamiz molecular.



Fuente: THOMPSON, Richard & MANNING, Francis. Oilfield Processing of Petroleum. [En línea]. Pennwell Publishing Company. Tulsa, Oklahoma, 1991. p. 175. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=FnDp8V9TX9oC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_g\\_e\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=FnDp8V9TX9oC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_g_e_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

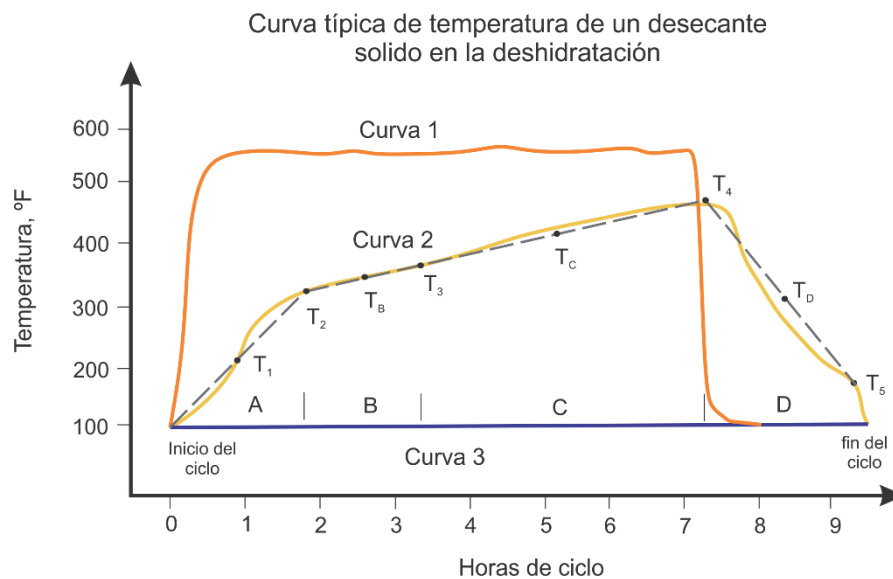
- **Capacidad de equilibrio dinámica ( $x_s$ ):** La capacidad de agua de un nuevo desecante no utilizado en el que el fluido fluye a través del desecante a una velocidad comercial. La capacidad dinámica es típicamente del 50-70% de la capacidad de equilibrio estático
- **Capacidad de útil del desecante ( $x$ ):** La capacidad de diseño que reconoce la pérdida de capacidad de desecante con el tiempo según lo determinado por la experiencia y las consideraciones económicas y el hecho de que el lecho desecante nunca puede ser utilizado completamente (el MTZ se deja en el lecho). La capacidad útil del desecante se encuentra en un rango de 7-14% y es calculada con la siguiente ecuación:

$$x = \frac{x_s h_B - 0.45 h_z x_s}{h_B} \quad (\text{Ecuación 41})$$

## 2.3 DISEÑO DE REGENERACIÓN

Después de haber realizado todos los cálculos para las dimensiones de las torres de adsorción, lo siguiente es determinar la cantidad de gas de regeneración necesario, así como las cargas de calentamiento y enfriamiento. Para poder estimar el valor de estas cargas, es necesario conocer el perfil de temperaturas en el proceso de regeneración mostrado en la *figura 7*, que serán utilizadas durante el diseño de este.

Figura 7. Curvas de temperatura calentamiento y enfriamiento.



Fuente: CAMPBELL, John. Gas conditioning and processing. Volume 2: The equipment modules. [En línea]. Campbell Petroleum Series. U.S.A, 1984. p.416. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/122207008/Gas-Conditioning-and-Processing-Volume-2-John-Campbell-Co>

El perfil de temperatura de T<sub>1</sub> a T<sub>4</sub>, es la temperatura del gas de salida del lecho. T<sub>H</sub> la temperatura del gas de regeneración que entra a la torre para regenerar el tamiz. El trayecto de T<sub>4</sub> a T<sub>5</sub> muestra la temperatura de salida del lecho durante el ciclo de enfriamiento.

El ciclo de regeneración se puede dividir en los cuatro intervalos mostrados en la *figura 7*, donde el intervalo A corresponde a todo el calor sensible, es decir, el tiempo que se necesita para calentar tanto el lecho, el acero y el agua que se adsorbe de  $T_1$  a  $T_2$ , en esta última temperatura el agua presente en el desecante comienza a hervirse. En el intervalo B ( $T_2$  a  $T_3$ ) se extrae la mayor parte del agua del lecho, por tal motivo, el calor suministrado debe ser suficiente no solo para evaporizar el agua sino también para romper las fuerzas de atracción que unen el agua a la superficie del adsorbente. Esto es comúnmente llamado el calor de humectación que corresponde a la suma del calor latente y el calor de desorción. Finalmente, cuando la mayor parte del agua ha sido expulsada del lecho, se encuentra el intervalo C ( $T_3$  a  $T_4$ ), que representa el tiempo requerido para eliminar contaminantes pesados y agua residual<sup>49</sup>.

En cuanto al tiempo de utilizado para la regeneración, este se calcula con la *ecuación 42*. Donde  $n$  corresponde al número total de lechos, es decir, los lechos en adsorción más el de regeneración.

$$t_r = \frac{t_a}{n - 1} \quad (\text{Ecuación 43})$$

**2.3.1 Calentamiento.** El calor o carga de calentamiento es la más importante ya que esta debe lograr en el proceso de regeneración calentar el desecante entre 400- 600°F, vaporizar el agua adsorbida y los hidrocarburos en el lecho, por último, calentar la torre y el acero.

Se debe proporcionar un perfil de temperatura adecuado que se adapte al tipo específico de tamiz molecular, junto con un tiempo de calentamiento suficiente, para alcanzar una meseta de temperatura de salida estable para marcar la finalización de la regeneración<sup>50</sup>.

---

<sup>49</sup> *Ibíd.*

<sup>50</sup> GAS PROCESSING & LNG. Op cit.

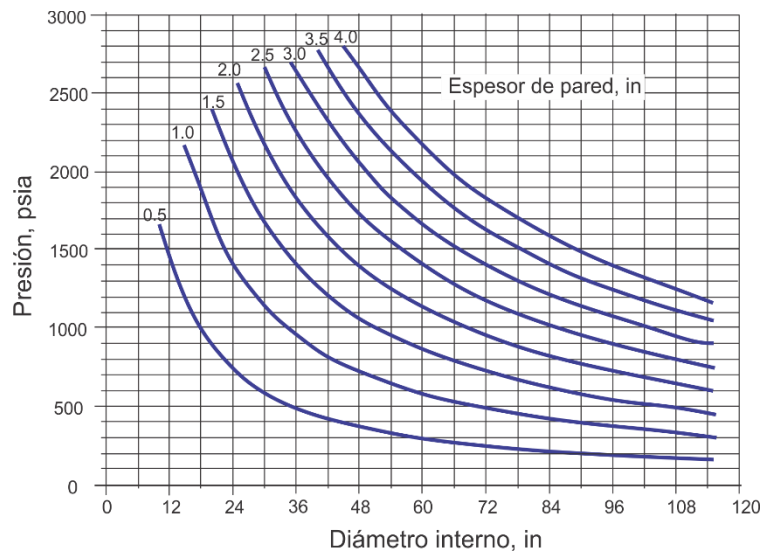
**2.3.1.1 Metodología de cálculo.** Principalmente se debe conocer la masa del acero de la torre que va a ser calentada en este ciclo.

- **Masa de acero de la torre:** Tanto el diámetro (d) como la longitud de la torre (h) fueron halladas en el diseño de adsorción, sin embargo, a la longitud calculada allí es necesario sumarle 5 ft que corresponden al espaciamiento entre el lecho y la entrada de la torre.

$$m_s = A h d t \quad (\text{Ecuación 43})$$

El valor del factor de peso (A) es 15 y el espesor de pared (h) debe ser escogido de la *figura 8*

Figura 8. Espesor de pared de la torre dependiente de la presión



Fuente: CAMPBELL, John. Gas conditioning and processing. Volume 2: The equipment modules. [En línea]. Campbell Petroleum Series. U.S.A, 1984. p.420. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/122207008/Gas-Conditioning-and-Processing-Volume-2-John-Campbell-Co>

- **Carga o calor de calentamiento:** Con el fin de hacer un poco más entendible los cálculos de la carga de calentamiento ( $Q_H$ ), esta es hallada por pasos donde

inicialmente se calcula la carga de calor de acero, posteriormente la carga del desecante y finalmente la carga de agua sensible como latente.

$$Q_H = Q_a + Q_d + Q_w + Q_{wd} + \text{Perdidas} \quad (\text{Ecuación 44})$$

Las pérdidas se calculan generalmente entre el 25-30% del valor calculado para el acero, el desecante y el agua.

- **Carga de calor del acero:** Es necesario conocer la masa del acero que ya fue calculada en el paso anterior, la capacidad calorífica del acero que es de 0.12 BTU/lbm-°F, y las temperaturas donde T1 corresponde a la temperatura de la corriente de gas de entrada al sistema y T4 a la temperatura final a la que sale el gas de la torre, es decir, la temperatura de parada del ciclo de calentamiento generalmente es el 90% de la temperatura del gas de entrada de regeneración<sup>51</sup>.

$$Q_a = m_s C_{pa} (T_4 - T_1) \quad (\text{Ecuación 45})$$

- **Carga de calor del desecante:** Las temperaturas usadas para el cálculo de la carga de calor del desecante son las mismas que las utilizadas en la *ecuación 45*, en cuanto a la masa del desecante se determina con la *ecuación 47* y la capacidad calorífica se muestra en la *tabla 4*.

$$Q_d = m_d C_{pd} (T_4 - T_1) \quad (\text{Ecuación 46})$$

$$m_d = \pi r^2 h_B \rho_B \quad (\text{Ecuación 47})$$

---

<sup>51</sup> ALMAKRAMI, Eisa; GADI, Amr. Op cit.

Para la masa del desecante se utiliza el radio y altura del lecho hallados en adsorción y la densidad aparente del desecante (*Ver tabla 4*).

- **Calor sensible del agua:** La masa de agua ya fue halla en el diseño de adsorción, la capacidad calorífica es de 1 BTU/lbm-°F, y la temperatura  $T_B$ , es un promedio entre  $T_2$  y  $T_3$ . Para desecantes comerciales,  $T_2$  es de 230°F y  $T_3$  de 260°F<sup>52</sup>.

$$Q_w = m_w C_{pw} (T_B - T_1) \quad (\text{Ecuación 48})$$

- **Calor latente del agua:** Para el cálculo del calor latente del agua, la masa es la misma de la *ecuación 48*. En cuanto al calor de desorción del agua este valor es aproximadamente 1800 BTU/lbm para tamices<sup>53</sup>.

$$Q_w = m_w (\text{calor de desorción}) \quad (\text{Ecuación 49})$$

- **Masa del gas de calentamiento:** Se asume que la masa del gas de calentamiento está aproximadamente entre un 5-15%, siendo generalmente un valor promedio usado 10% del flujo total del proceso <sup>54</sup>.

$$m = \frac{Q_H}{C_p \theta_H \Delta T_H} \quad (\text{Ecuación 50})$$

El valor de  $\Delta T_H$  corresponde a la temperatura logarítmica entre  $T_H$  y  $T_1$ , en cuanto al tiempo de calentamiento este es generalmente entre el 60-70% del tiempo total

---

<sup>52</sup> CAMPBELL, John. Op cit., p.417.

<sup>53</sup> *Ibíd.* p.419.

<sup>54</sup> HEROLD, Ruud & MOKHATAB, Saeid. Optimal design and operation of molecular sieve gas dehydration units - Part 1. Op cit., p.6.

de regeneración. Este tiempo de calentamiento no debe ser menor a 1 hora ni mayor a 8 horas<sup>55</sup>.

- **Caudal estándar del gas de regeneración**

$$m = \frac{379.5 * 24 * m}{\gamma MW_a} \quad (\text{Ecuación 51})$$

**2.3.2 Enfriamiento.** El proceso de refrigeración o enfriamiento utiliza la misma masa de gas calculada para el calentamiento, con la diferencia que esta no es pasada por el horno, sino que se utiliza a la temperatura de la corriente de entrada del gas. Es utilizada con el fin de disminuir la temperatura a la cual el ciclo de calentamiento ha dejado el lecho, para que posteriormente este quede en el estado adecuado para volver a realizar el proceso de adsorción. El tiempo de enfriamiento es aproximadamente el 30-40% del tiempo total para regeneración.

**2.3.2.1 Metodología de cálculo.** En los cálculos para el ciclo de enfriamiento, muchos de los datos que serán utilizados ya han sido calculados para el calentamiento, por lo tanto, serán omitidas sus ecuaciones en esta sección.

- **Carga de enfriamiento:** La carga de enfriamiento comprende tanto el enfriamiento del acero como la del desecante.

$$Q_D = Q_a + Q_d \quad (\text{Ecuación 52})$$

- **Carga de enfriamiento del acero y del desecante:** T5 corresponde a la temperatura final del proceso de enfriamiento, es decir, la temperatura de

---

<sup>55</sup> CAMPBELL, John. Op cit., p. 418.

parada de este ciclo, la cual debe estar entre 18-27°F por encima de la del gas a deshidratar<sup>56</sup>.

$$Q_a = m_s C_{pa} (T_4 - T_5) \quad (\text{Ecuación 53})$$

$$Q_d = m_d C_{pd} (T_4 - T_5) \quad (\text{Ecuación 53})$$

Finalmente, es necesario tener en cuenta que la velocidad mínima del gas de calentamiento debe exceder la que da un  $\Delta P = 0.01$  psi/ft, para asegurar una buena distribución del flujo y la remoción del agua. Además, es fundamental que la temperatura del gas que sale del sistema, es decir, después de pasar por todos los equipos y finalmente salir del compresor se encuentre en un rango de 15-20°F por encima de la temperatura del gas a deshidratar, con el objetivo de poder ser mezclado con este y posteriormente ingresar al sistema<sup>57</sup>.

---

<sup>56</sup> *Ibíd.* p.400.

<sup>57</sup> ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. *Surface Production Operations: Design of gas-handling systems and facilities.* Op cit., p.231.

### 3. TENDENCIAS EN LA ENSEÑANZA DE LAS INGENIERÍAS

En la ingeniería los conceptos teóricos han sido enseñado en las aulas de clases por métodos convencionales tales como el video beam que, si bien ayudan al educador a dictar e introducir los conceptos del curso, son muy limitados puesto que, tanto estudiantes como profesores coinciden que la comprensión de estos conceptos puede llegar a ser más fácil si son revisados en la práctica. En los cursos de ingeniería frecuentemente se enfrenta esta situación<sup>58</sup>. Por tal motivo, hoy en día los instructores se enfrentan a nuevos retos en donde la tarea principal consiste, en determinar la mejor manera de utilizar los recursos de tecnología disponibles para mejorar el aprendizaje de los estudiantes. Un informe del Departamento de Educación de los Estados Unidos (2000) indica que: Los maestros deben sentirse cómodos con la tecnología, ser capaces de aplicarla de manera adecuada y estar familiarizados con las nuevas herramientas, recursos y enfoques tecnológicos. Si todas las piezas se colocan en su lugar, los maestros deben descubrir que están capacitados para mejorar sus propias habilidades profesionales a través de estas herramientas también<sup>59</sup>.

En los últimos años la forma en como se ha enseñado la ingeniería ha ido cambiado, ya que la necesidad de “aprender haciendo”<sup>60</sup> ha llevado a la implementación del software educativo y comercial en las aulas de clases, no solo por el acercamiento de las clases teóricas a la práctica sino también la facilidad para el estudiante, puesto que muchos de los cálculos de ingeniería, incluso en el nivel de los cursos de pregrado, son complicados y requieren de un tiempo

---

<sup>58</sup> DABAGHIAN, Zoheir; MOVAGHARNEJAD, Kamyar & MOHAMMADI, Maedeh. Development of educational software for undergraduate chemical engineering courses. [En línea]. Computer Applications in Engineering education. April 2016. [Consultado el 7 de junio de 2018]. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/cae.21733>

<sup>59</sup> KEENGWE, Jared, ONCHWARI, Grace, & WACHIRA, Patrick. The use of computer tools to support meaningful learning. [En línea]. AACE Journal, 2008. 16(1), 77-92. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.597.7776&rep=rep1&type=pdf>

<sup>60</sup> FERNANDES, Fabiano & RODRIGUES, Sueli. Educational Software for Gas-Solid and Liquid-solid separation equipment [En línea]. Wiley InterScience. 2004. [Consultado el 7 de junio de 2018]. Disponible en: DOI 10.1002/cae.10051

considerable. Sin embargo, el software comercial a pesar de realizar diseños completos, detallados y con gran exactitud están destinados a profesionales con una comprensión completa de los equipos de proceso y no son adecuados para fines didácticos cuando se pretende comprender los fenómenos que influyen en la funcionalidad del equipo<sup>61</sup>.

Por otra parte, el software pedagógico es utilizado con el fin de complementar los conceptos y mejorar la calidad de la educación en las ingenierías, gracias a que este brinda más capacidades de análisis, tiempos de aprendizaje más cortos, mejor comprensión de los fenómenos y mayor eficiencia en el aprendizaje del estudiante<sup>62</sup>. El software educativo ofrece diferentes beneficios como la integración de contenido multimedia, proporcionando al usuario la posibilidad de mejorar la interactividad con los temas vistos; la interfaz visual facilita que los alumnos se interesen en mayor grado por lo que se involucran con el contenido de las lecciones; simplifica los métodos de enseñanza para que los estudiantes puedan aprender por sí mismos; promueve el aprendizaje productivo ya que lleva los conceptos teóricos enseñados en clase a la práctica; además ayuda a los educadores a tener una mejor conexión con los estudiantes para mantener su interés en la lección. Finalmente, el objetivo de este tipo de software es poder hacer la enseñanza interesante y orientado a objetivos<sup>63</sup>.

El acompañamiento del software como herramienta educativa en las aulas de clase, ha tenido un evidente crecimiento durante los últimos ocho años para el desarrollo de habilidades analíticas y de toma de decisiones; este fenómeno se puede evidenciar en los cerca de 44000 artículos investigativos publicados en la base de datos bibliográfica Elsevier durante este periodo de tiempo que incluyen el

---

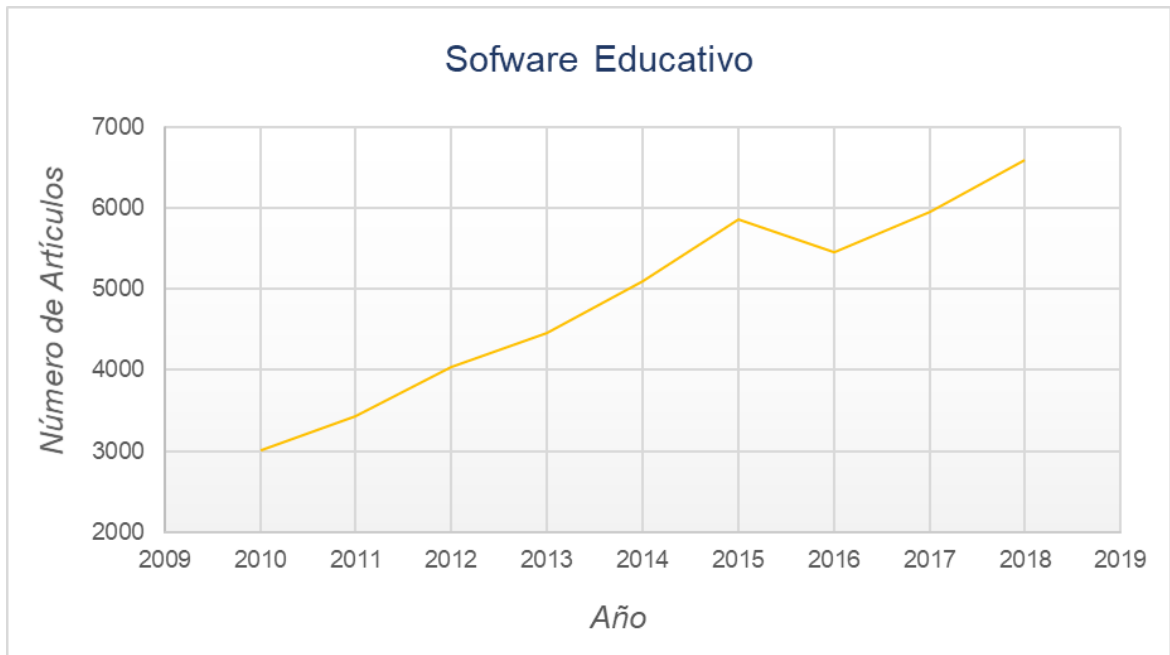
<sup>61</sup> CARTAXO, Samuel; SILVINO, Pedro & FERNANDES, Fabiano. Transient analysis of Shell-and-tube heat exchangers using an educational software. [En línea]. Chemical Engineers. Universidade Federal do Ceara: Fortaleza, CE, Brazil, 2014. [Consultado el 7 de junio de 2018]. Disponible en: <http://daneshyari.com/article/preview/178485.pdf>

<sup>62</sup> LONA BATISTA, Liliane, et al. Op cit.

<sup>63</sup> ROSEN, Marc. Engineering Education: Future Trends and Advances. [En línea]. University of Ontario: Canada, 2009. [Consultado el 10 de junio de 2018]. Disponible en: <http://www.uoit.ca>

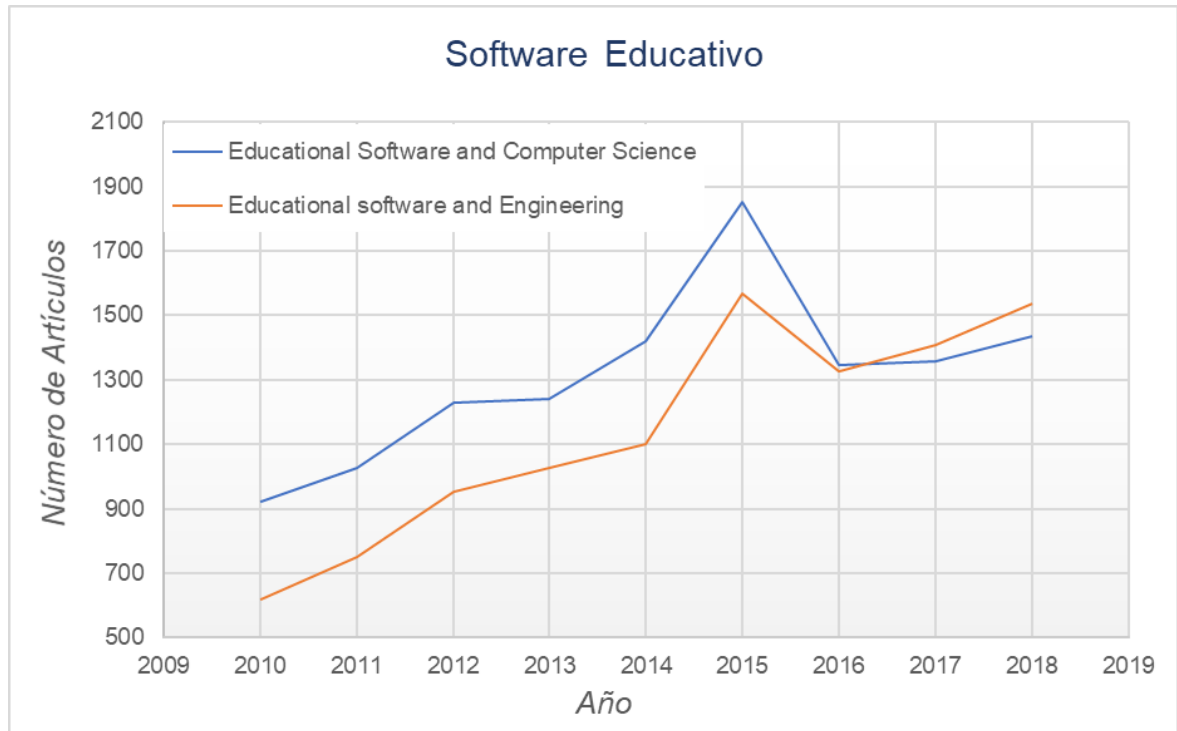
término “Educational software” como el foco de investigación, y el aumento de más del doble de publicaciones en el 2018 con respecto al 2010 como se muestra en la *figura 9*.

Figura 9. Artículos de investigación indexados en ELSEVIER relacionados con software educativo.



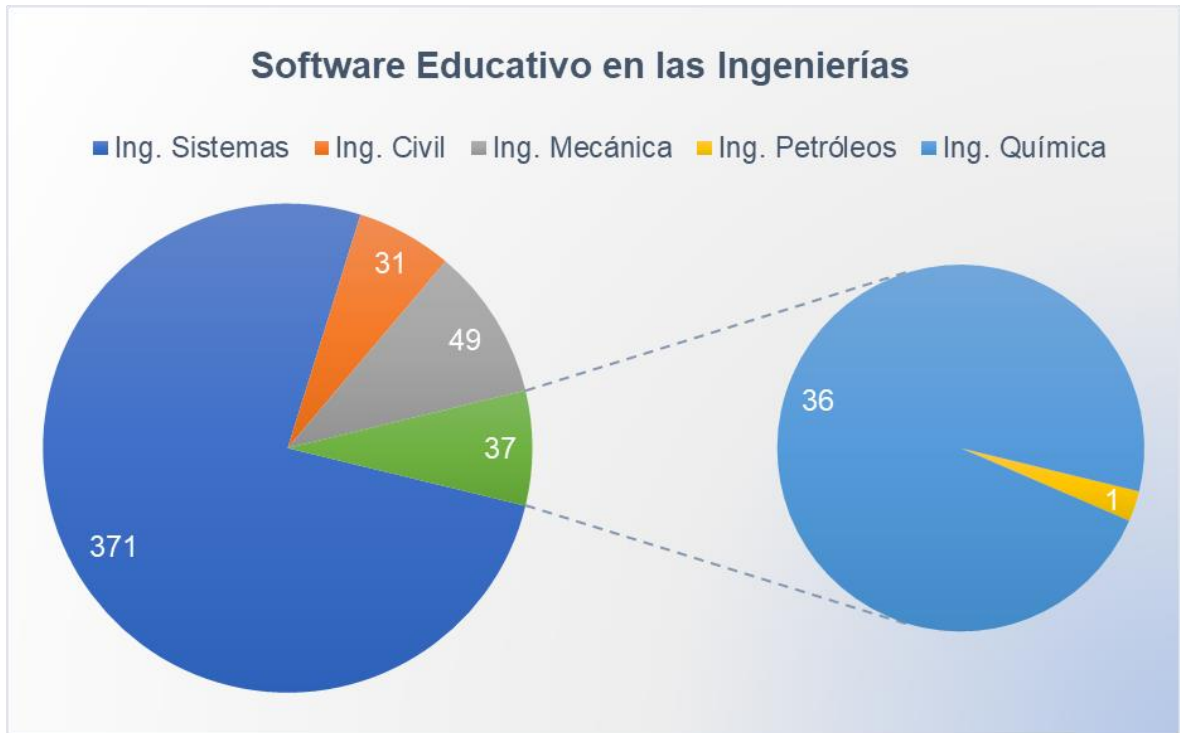
Después de filtrar un poco más los datos obtenidos anteriormente, se evidencia una tendencia creciente en el uso del software educativo, especialmente en dos áreas diferentes de la educación como se muestra en la *figura 10*. Dichas áreas son: Educational software and Computer Science y Educational software and Engineering, en los que se encuentran aproximadamente 12000 y 10000 artículos respectivamente.

Figura 10. Artículos de investigación indexados en ELSEVIER relacionados con Educational software and computer Science y Engineering.



De la gráfica anterior se puede evidenciar que en los últimos tres años el software educativo en la ingeniería ha tenido mayores aportes, por lo tanto, se realizó una búsqueda más detallada en la base de datos bibliográfica de Elsevier de algunas ingenierías entre ellas la ingeniería de petróleos, la cual no presenta un panorama muy alentador para estas áreas del conocimiento. En la *figura 11* se muestra el aporte de las ingenierías como civil con 31 artículos, química 36, mecánica 39, petróleos 1 e ingeniería de sistemas con 371 artículos.

Figura 11. Artículos de investigación indexados en ELSEVIER relacionados con Educational software en algunas ingenierías.



Como se puede evidenciar en el gráfico anterior, en el área de ingeniería de petróleo la cantidad de artículos investigativos relacionados con software educativos es casi nula, creando la necesidad de implementar este tipo de herramientas para disminuir la gran brecha con respecto a las otras ingenierías.

Dentro del caso particular de la industria oil & gas, los desafíos que las nuevas generaciones de profesionales deberán enfrentar son principalmente el desarrollo de competencias y habilidades que no se encuentran o se desarrollan en menor medida en los currículos tradicionales de pregrado. Competencias de (1) liderazgo, (2) interdisciplinarias, (3) interculturales y de (4) HSE, son cada vez más importantes para los profesionales que trabajan en esta industria, debido a que su ambiente de trabajo involucra aspectos tanto técnicos como no técnicos, tiene un mayor impacto en HSE y cada vez se asumen retos más complejos,

multidisciplinarios y de ámbito global. El desarrollo de la competencia en liderazgo a nivel de pregrado es una necesidad esencial para el futuro profesional<sup>64</sup>. Sin embargo, no se debe descuidar las competencias básicas con las que debe contar todo ingeniero para ser competente en el ámbito laboral.

Por lo tanto, los métodos de enseñanza convencionales deben ir acompañados con el uso de software educativo como herramienta de apoyo, debido a que estos se están integrando como complemento a los planes de estudio para suplir el tiempo requerido en desarrollar las competencias y habilidades básicas que el estudiante requerirá en su ambiente laboral. Esta mezcla de herramientas tecnológicas y ambientes virtuales permite que el estudiante asimile conceptos, metodologías, teorías e implemente la resolución de problemas sin aumentar el tiempo en las clases presenciales.

---

<sup>64</sup> LAU, Hong. Competency Development for the Next Generation of Petroleum Engineers. [En línea]. SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi, November 2017, pp 13–16. [Consultado el 8 de junio de 2018]. Disponible en: <https://doi.org/10.2118/188466-MS>

## 4. SOFTWARE PEDAGÓGICO “GD-SIEVE”

GD-SIEVE, es un software pedagógico que permite el diseño de los diferentes equipos involucrados en el sistema de deshidratación de gas natural con tamices moleculares, que puede ser implementado en la asignatura de Ingeniería del gas en el programa de pregrado de Ingeniería de petróleos que ofrece la Universidad Industrial de Santander, debido a que el tercer módulo de este programa consta de Plantas de tratamiento del gas en donde la deshidratación con desecantes solidos es uno de los temas a tratar. Es necesario tener presente, que para el cálculo de cada uno de los módulos que se mencionarán más adelante, se siguió la metodología presentada en el capítulo 3.

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Para desarrollar el software, se implementó como lenguaje de programación Visual Basic. Este es un lenguaje diseñado para crear aplicaciones orientadas a objetos, donde se utilizan formularios y controles con el fin de crear la interfaz de los programas; admite elementos de lenguaje y construcciones de programación comunes. Dentro de sus ventajas Visual Basic ofrece una manera rápida y sencilla de crear aplicaciones basadas en .NET Framework ya que tiene una curva de aprendizaje muy rápida y permite usar con facilidad la plataforma de los sistemas Windows.

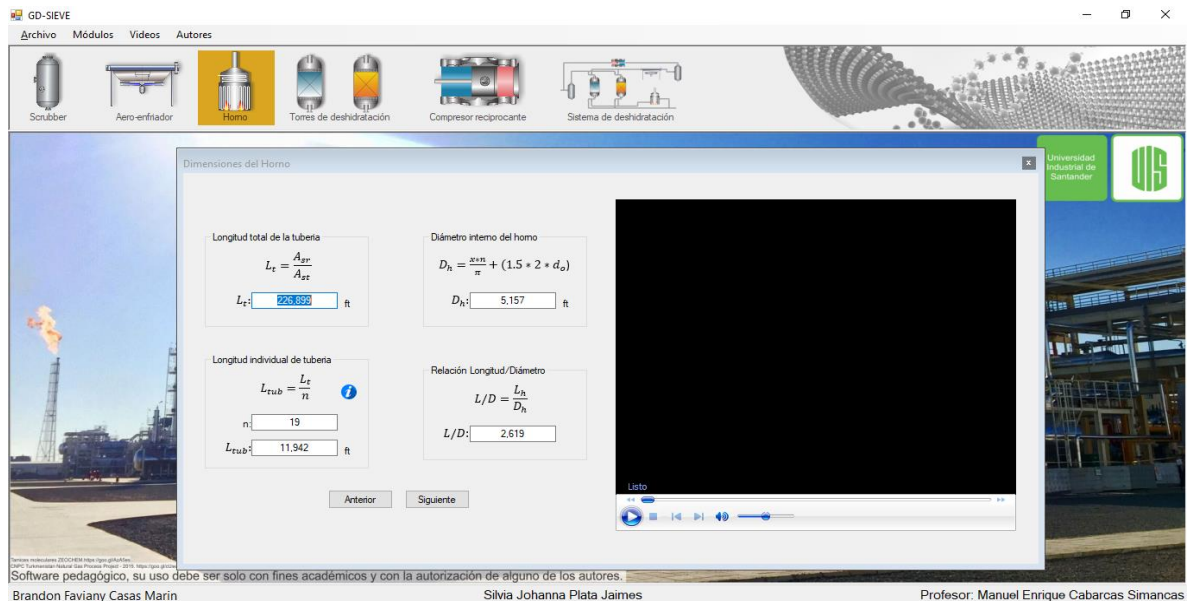
El software presenta una interfaz interactiva y amigable con el usuario como se muestra en la *figura 12*, donde se evidencian seis módulos que se dividen en el diseño del scrubber, aero-enfriador, horno, torres de deshidratación, compresor y finalmente el diseño del sistema de deshidratación total. En el diseño de cada equipo se muestra detalladamente las ecuaciones y los resultados para que los estudiantes puedan comparar paso a paso los ejercicios que ellos realizan a mano.

Figura 12. Interfaz y/o ventana inicial del software GD-SIEVE



Además de los conceptos teóricos que ofrece el software, este brinda ayudas como imágenes, gráficos 2D y videos que describen de una manera didáctica fenómenos físicos que se presentan al interior de cada uno de los equipos de deshidratación con tamices moleculares. La *figura 13* presenta un ejemplo de los videos que pueden ser encontrados en el software.

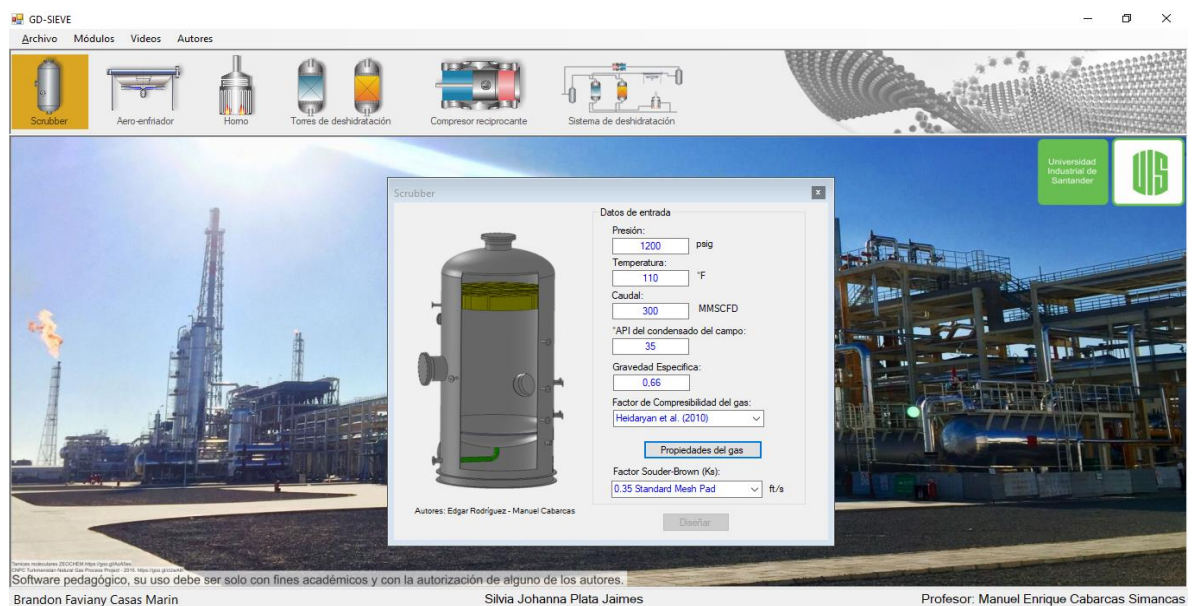
Figura 13. Video del horno.



Cada uno de los módulos tienen la opción de calcular las propiedades del gas por método composicional o por gravedad específica, la cual dependerá de la información que tenga el usuario del gas para el diseño.

En el primero de los módulos, es posible realizar un diseño detallado del scrubber el cual elimina el agua libre de la corriente de gas. En este módulo como se muestra en la *figura 14*, el usuario tendrá que incluir propiedades del gas como presión, temperatura y caudal, incluir la gravedad API del condensado y además podrá escoger el factor Ks y a su vez el tipo de extractor de niebla seleccionado, con el fin de obtener un diseño del diámetro de la boquilla de entrada, de la boquilla de salida del gas, de la boquilla de salida del líquido, el diámetro y altura total del separador.

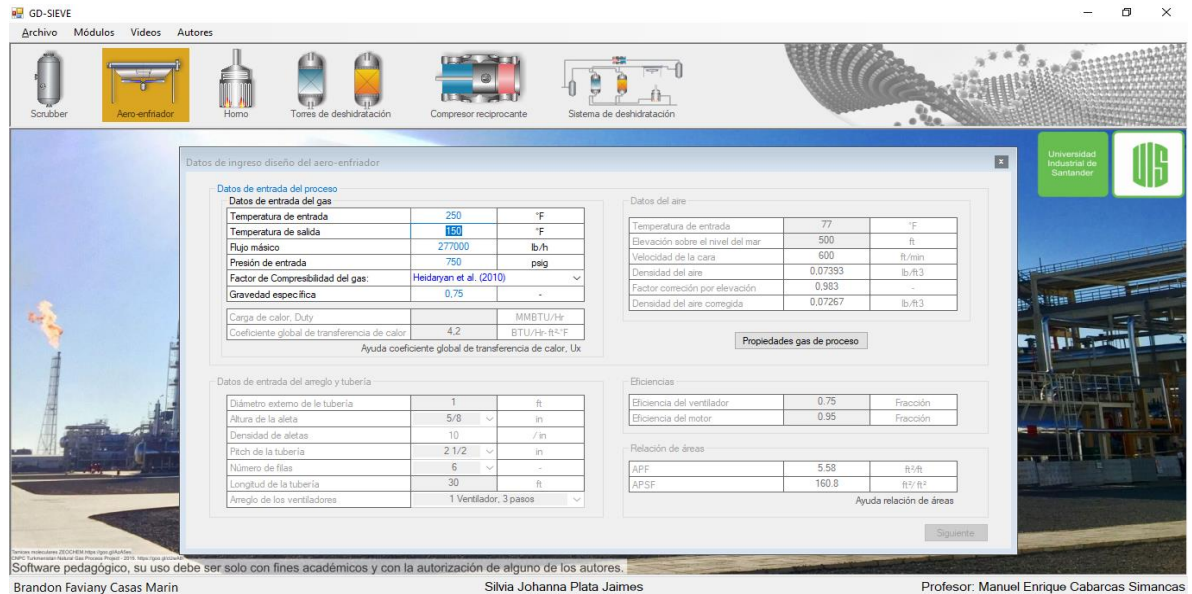
Figura 14. Ventana inicial para el diseño del Scrubber



Por otra parte, el segundo módulo permite el diseño detallado del aero-enfriador donde el usuario además de incluir los datos operacionales para el cálculo de las propiedades del gas y a su vez del Duty, podrá seleccionar la configuración del arreglo y tubería de este, es decir, tendrá la opción de escoger entre dos tamaños

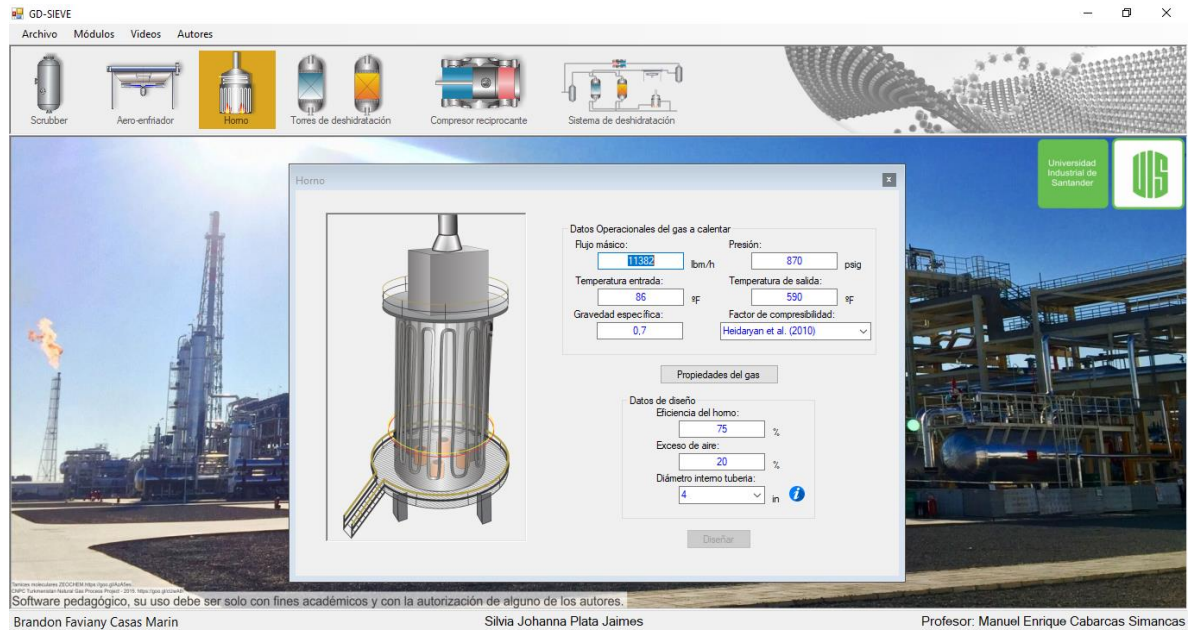
de aletas, tres de pitch de la tubería, cuatro opciones de número de filas y cuatro posibilidades de arreglo de los ventiladores, entre otros datos incluidos allí. Además, deberá incluir los datos del aire y la eficiencia tanto del ventilador como el motor (Ver figura 15).

Figura 15. Ventana inicial para el diseño del Aero-enfriador



En la figura 16 se muestra la ventana inicial del diseño detallado del horno, es decir, el tercer módulo donde el usuario tendrá que introducir datos operacionales como flujo másico, temperaturas de entrada, de salida y presión con el fin de poder obtener el Duty generado. Entre los datos de diseño es necesario conocer la eficiencia del horno y el exceso de aire a manejar; además, se da la opción de elegir entre diferentes tamaños de diámetro interno de la tubería por la cual fluye el gas de regeneración.

Figura 16. Ventana inicial para el diseño del horno



En el cuarto módulo, es posible realizar el diseño detallado de las torres de deshidratación que eliminan el vapor de agua de la corriente de gas, donde el usuario tendrá que introducir datos de presión, temperatura, caudal, el número de lechos en adsorción, tiempo de adsorción y podrá escoger entre cuatro tipos de partícula de tamiz molecular (*Ver figura 17*). Sin embargo, el número de lechos y tiempo de adsorción son sugeridos por el software, en caso de que el usuario no cuente con estos datos. Una vez realizado todo el diseño de adsorción, es necesario introducir los datos para el diseño de regeneración como se muestra en la *figura 18*, temperatura de salida del gas de la torre de regeneración y la del horno, tiempo de calentamiento y enfriamiento.

Figura 17. Ventana inicial para el diseño de la torre de adsorción

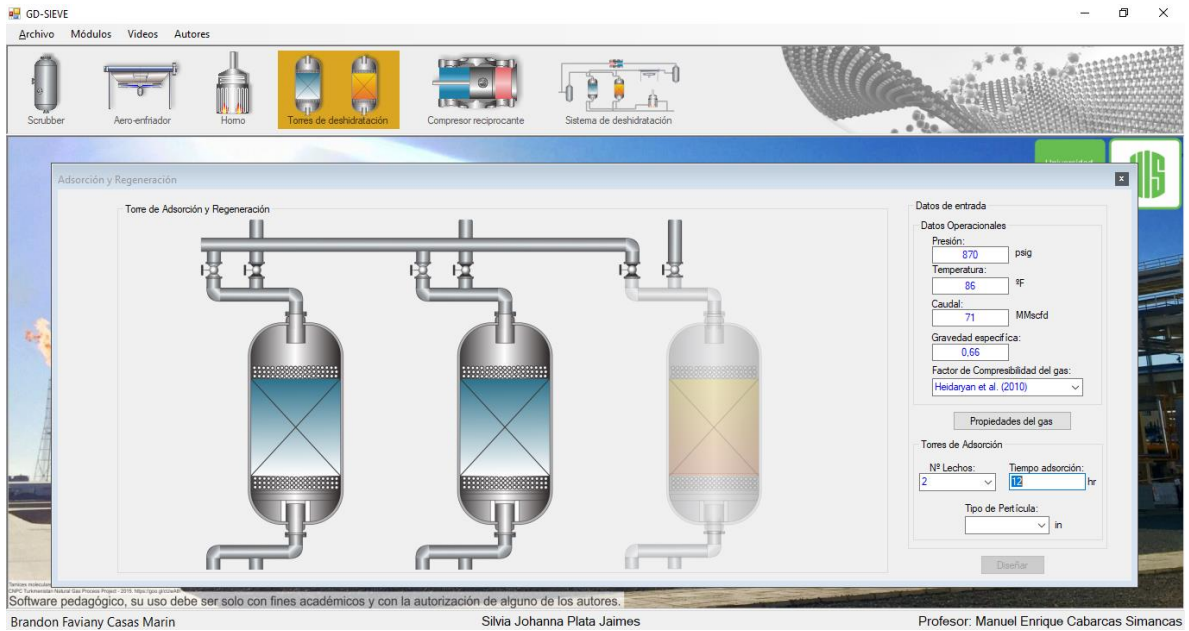
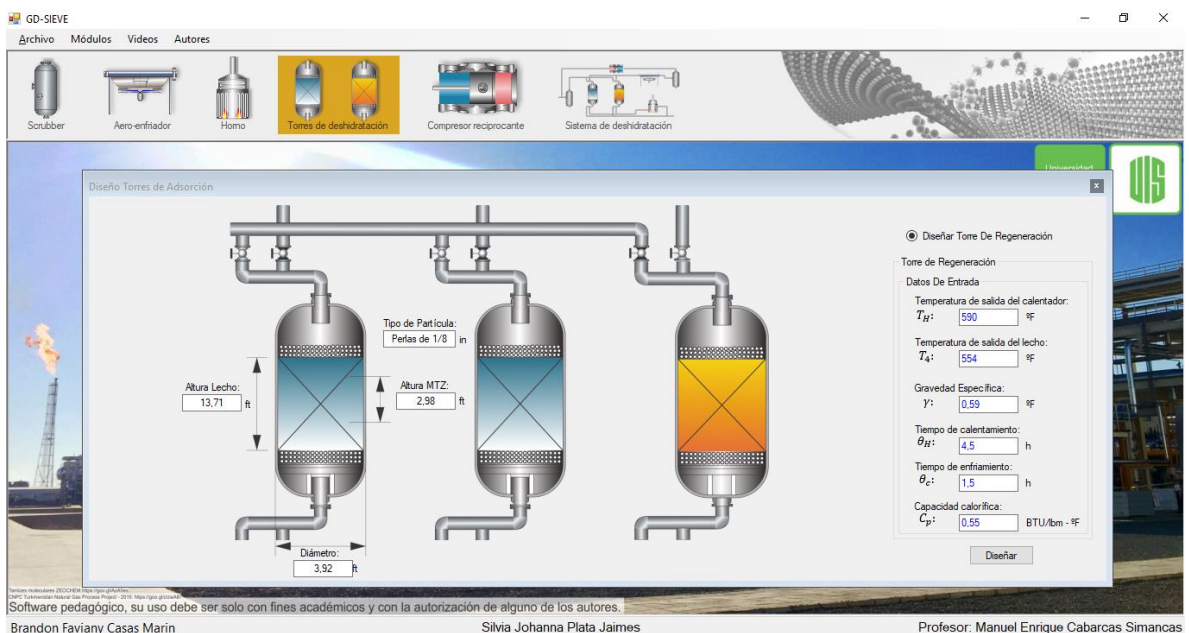


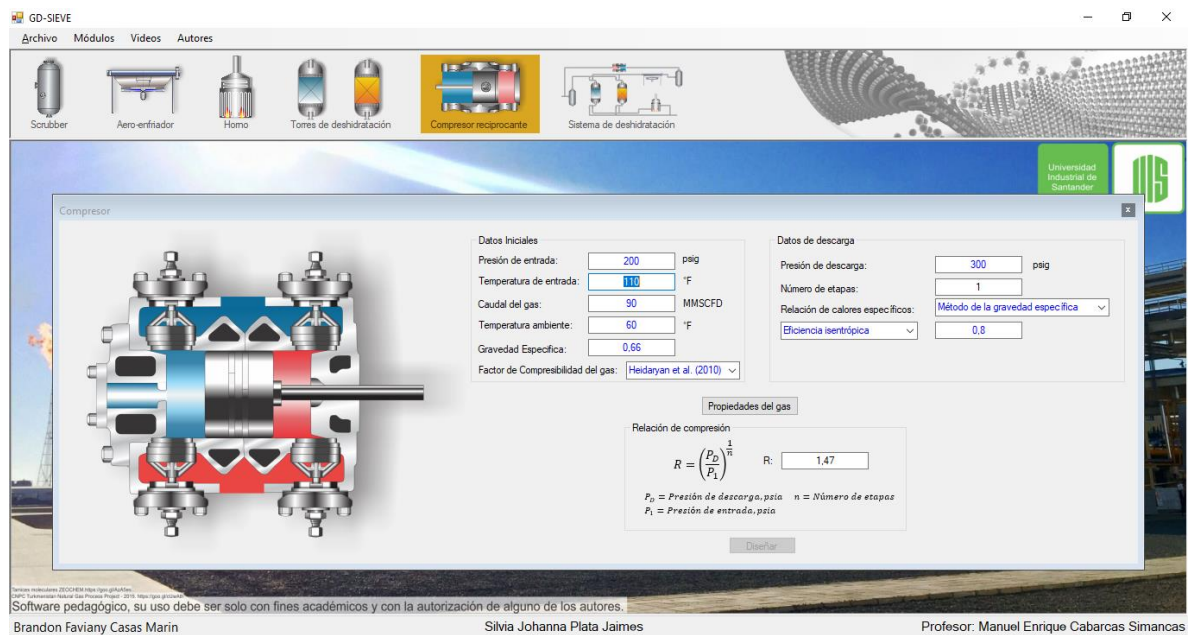
Figura 18. Ventana inicial para el diseño de la torre de regeneración



En el quinto módulo como se muestra en la *figura 19* se podrá realizar el diseño detallado del compresor donde es necesario conocer la temperatura de entrada y

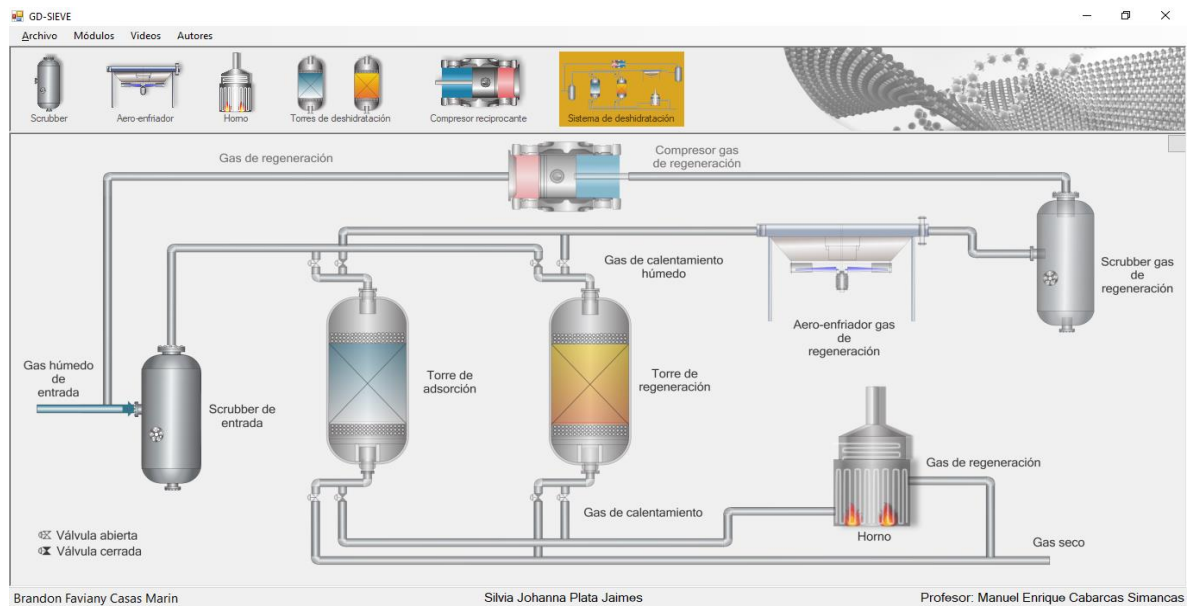
ambiente, presión de entrada y de descarga, caudal de gas y además, el usuario podrá escoger el método para hallar la relación de calores específicos y el tipo de eficiencia ya sea isentrópica o politrópica. En cuanto al número de etapas, este solo está disponible para una etapa ya que en los sistemas de deshidratación de gas natural con tamices moleculares la presión necesaria no excede los 50 psi.

Figura 19. Ventana inicial para el diseño del compresor



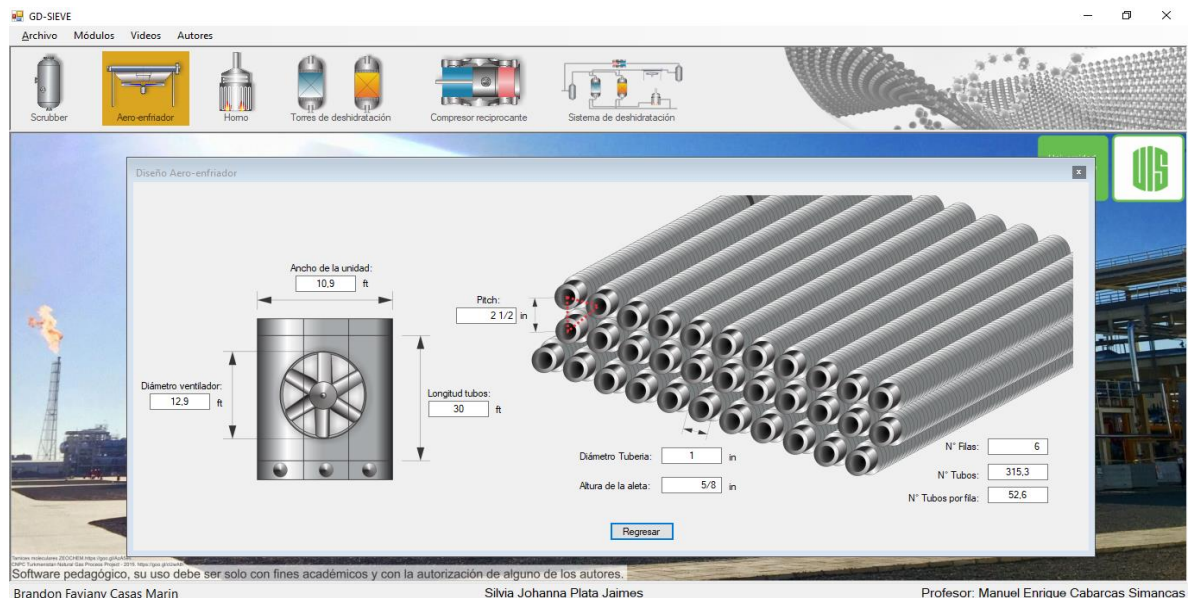
Finalmente, en el último módulo el usuario podrá realizar el diseño total del sistema de deshidratación del gas natural con tamices moleculares, es decir, encontrará todos los equipos como se muestra en la figura 20. El diseño de este módulo es un ensamblaje de los cinco anteriores, por lo tanto, el usuario deberá introducir los datos comunes como presión, temperatura y caudal en el scrubber que es el equipo inicial, y posteriormente en cada uno de los equipos los datos necesarios para sus diseños. Cada vez que un equipo este completamente diseñado, este va a resaltar su color indicando que es posible continuar con el diseño del siguiente.

Figura 20. Ventana para el diseño del sistema completo de deshidratación con tamices moleculares



En la ventana final de todos los módulos se presenta el diseño detallado del equipo que se esté diseñando y los datos obtenidos en las ventanas anteriores tal como se muestra en la *figura 21*.

Figura 21. Ventana final del aero-enfriador



## 4.2 VALIDACIÓN

La validación del software se desarrolló por módulos en el mismo orden como fueron presentados anteriormente, es decir, iniciando con el módulo de scrubber y finalizando con el compresor. Los datos utilizados para la validación fueron tomados de literatura. El módulo de las torres de deshidratación fue validado con el software John M. Campbell & Co.: GCAP\*; el módulo del compresor, el del horno y las propiedades del gas se validaron con el software Aspen Hysys\*; por último, tanto el módulo de scrubber como el aero-enfriador son validados con ejercicios de literatura.

Tabla 7. Validación de las propiedades del gas

Propiedad	Unidad	Hysys	GD-SIEVE	%Error
Peso molecular	Lbm/lb mol	18	18	0
Densidad	Lbm/ft <sup>3</sup>	3.1	3.1	0
Factor de compresibilidad	-	0.862	0.862	0
Viscosidad	cp	0.01299	0.013	0.07
Contenido de agua	Lbm/MMSCFD	42.61	42.83	0.51
Capacidad calorífica	BTU/lbm	0.6157	0.63	2.32

Tabla 8. Validación del módulo 1: Scrubber

Propiedad	Unidad	Literatura	GD-SIEVE	%Error
Velocidad del gas permitida	ft/s	0.6	0.61	1.67
Tasa de flujo de gas	ft <sup>3</sup> /s	37.8	39.26	3.86
Diámetro interno del scrubber	ft	8.95	9.05	1.11
Densidad de la mezcla	Lbm/ft <sup>3</sup>	4.93	4.8	2.63
Velocidad de entrada de la mezcla	ft/s	14.4	14.61	1.45
Din de la boquilla de entrada de la mezcla	in	21.9	22.2	1.36
Din de la boquilla de salida del gas	in	16	16.2	1.25

Los errores que se dan en el scrubber son debido al error del factor de compresibilidad, ya que para este equipo se realizaron los cálculos de propiedades del gas por el método de gravedad específica, debido a que el

\* Software John M. Campbell & Co.: GCAP, versión de 90 días de prueba. Disponible en: <https://www.jmcampbell.com/gcap-software.php>

\* Software Aspen hysys, uso libre campus central Universidad Industrial de Santander.

ejercicio de literatura proporciona este dato para el diseño. Sin embargo, si se realiza por método composicional, el scrubber no generará ningún error en sus cálculos ya que como se muestra en la *tabla 7*, el factor de compresibilidad coincide con el calculado en el Software GD-SIEVE.

Tabla 9. Validación del módulo 2: aero-enfriador

Propiedad	Unidad	Literatura	GD-SIEVE	%Error
LMTD	°F	71.3	72.76	2.04
Temperatura de salida del aire	°F	152	148.4	2.36
Área de la tubería desnuda	ft <sup>2</sup>	50090	49082,4	2.01
Área de la cara	ft <sup>2</sup>	465	457.9	1.52
Número de tubos	-	299	294	1.67
Flujo másico del aire	Lb/hr	1200000	1285324.7	7.11
Área del ventilador	ft <sup>2</sup>	93	91.6	1.5
Diámetro del ventilador	Ft	11	10.8	1.81
Volumen actual de aire (por ventilador)	ACFM	142000	151093	6.4

Tabla 10. Validación del módulo 3: horno

Propiedad	Unidad	Hysys	GD-SIEVE	%Error
Duty requerido para calentar el gas	MMBTU/hr	3.855	3.596	6.71
Área superficial total	ft <sup>2</sup>	261.1	269.723	3.3
Longitud de la tubería	ft	12.47	11.448	8.19
Número de tubos	-	20	19	5
Diámetro del horno	ft	5.577	5.157	7.53

Tabla 11. Validación del módulo 4: Torres de deshidratación

Propiedad	Unidad	GCAP	GD-SIEVE	%Error
Velocidad superficial del gas	ft/min	30.44	31.6	3.81
Diámetro de la torre	ft	3.99	3.92	1.75
Carga de agua por ciclo	Lbm	735.03	735.06	0.004
Longitud del lecho	ft	13.6	13.82	1.61
Caída de presión	psi/ft	4.07	4.41	8.35
Capacidad útil del desecante	%wt	12.63	12.65	0.15
Longitud MTZ	ft	2.96	2.98	0.67
Carga de calentamiento	MMBTU/ciclo	3.441	3.45	0.26
Carga de enfriamiento	MMBTU/ciclo	1.241	1.25	0.72
Calor del horno	MMBTU/hr	2.151	2.28	5.99

Tabla 12. Validación del módulo 5: Compresor

<b>Propiedad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Hysys</b>	<b>GD-SIEVE</b>	<b>%Error</b>
Relación de compresión	-	1.5	1.5	0
Exponente isentrópico	-	1.2934	1.299	0.42
Temperatura de descarga	°F	178	175.51	1.39
Potencia	HP	2291.51	2282.7	0.38

## 5. CONCLUSIONES

- A partir de la revisión bibliográfica realizada se pudo evidenciar que, entre los parámetros más influyentes en el diseño del sistema de deshidratación, se encuentran el contenido de agua presente en el gas a deshidratar, la caída de presión de la torre y el calor necesario para regenerar el tamiz molecular. Debido a que estos determinan la cantidad de desecante a utilizar, dimensiones de la torre y la forma adecuada de regeneración del desecante para obtener una buena deshidratación del gas.
- Se ha logrado desarrollar e implementar una herramienta cuyo enfoque modular permite a los usuarios comprender todo el proceso de diseño de los diferentes equipos que se encuentran en el sistema de deshidratación del gas natural con tamices moleculares. De igual manera, el software presenta una interfaz agradable con el usuario y de fácil manejo, incorporando videos, imágenes 2D y facilitando el entendimiento de los fenómenos de manera secuencial hasta llegar a la representación gráfica de todos los cálculos realizados.
- A partir de los resultados proporcionados por el software educativo **GD-SIEVE** enfocado en diseñar los equipos del sistema de deshidratación con tamices moleculares, se puede determinar que el error entre los obtenidos por el software de tipo comercial y el calculado es menor al 8%.
- **GD-SIEVE** es un software educativo que permite de manera práctica mejorar la adquisición de diseño en los estudiantes de Ingeniería de petróleos por competencias, de tal forma que los programas dediquen más tiempo al análisis de los resultados y no al cálculo de procedimientos mecánicos y repetitivos.

## 6. RECOMENDACIONES

- Integrar en las torres de deshidratación la posibilidad de seleccionar en el mismo diseño diferentes tipos de partículas del tamiz molecular, así como la cantidad de capas de bolas de cerámica y sus respectivos tamaños. Además, complementar el software con otros desecantes sólidos como sílice gel y alúmina.
- Durante la operación del sistema se debe realizar la apertura y cierre de las válvulas con el fin de cambiar las torres de adsorción a regeneración y viceversa, se recomienda realizar el diseño de estas para su funcionamiento y así obtener un control del proceso.
- Debido a los procesos físicos que sufre el gas al pasar por cada equipo que conforma el sistema de deshidratación, es recomendable integrar el balance de masa en cada uno de estos que, aunque no afecta significativamente los cálculos para el diseño, ayudaría a aumentar la precisión del software.
- Implementar en el software cálculos para el costo de instalación de los equipos del sistema de deshidratación y de los diferentes tipos de partícula del tamiz molecular, además el análisis de selección de estos.

## BIBLIOGRAFÍA

AHMED, Tarek. Equations of State and PVT Analysis: Applications for Improved Reservoir Modeling. [En línea]. 1ra Edición. Gulf Publishing Company. Houston, Texas, 2007. Disponible en: <file:///E:/Downloads/Ahmed,%20T.%20-%20Equation%20of%20State%20and%20PVT%20Analysis.pdf>

ALMAKRAMI, Eisa; GADI, Amr. Optimizing Dehydrators Operation Using Dynamic Adsorption time. [En línea]. International Petroleum Technology Conference. One Petro. Beijing, China, 2013. Disponible en: <https://doi.org/10.2523/IPTC-16621-Abstract>

ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of gas-handling systems and facilities. [En línea]. Volume 2. Gulf Professional Publishing Elsevier. Houston, Texas, 1999. pp.229-235. Disponible en: [http://www.boti.oil.gov.iq/book/english%20ebooks/%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7%20%D9%88%D8%A7%D9%84%D8%AC%D9%8A%D9%84%D9%88%D8%AC%D9%8A%D8%A7/-%20Surface%20Production%20Operations%20\(Volumen%202,%202nd%20Ed\).pdf](http://www.boti.oil.gov.iq/book/english%20ebooks/%D8%A7%D9%84%D9%86%D9%81%D8%B7%20%D9%88%D8%A7%D9%84%D8%AC%D9%8A%D9%84%D9%88%D8%AC%D9%8A%D8%A7/-%20Surface%20Production%20Operations%20(Volumen%202,%202nd%20Ed).pdf)

ARNOLD, Ken & STEWART, Maurice. Surface production operations: Design of oil handling systems and facilities. [En línea]. Volume 1. 3ra Edition. Gulf Professional Publishing Elsevier. Houston, Texas, Agosto, 2007. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7853-7.X5001-7>

BOTHAMALEY, Mark. Gas-Liquid Separators: Quantifying separation performance part 2. [En línea]. Oil and Gas Facilities. October, 2013. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/274747519\\_GasLiquids\\_Separators\\_Quantifying\\_Separation\\_Performance\\_-\\_Part\\_2](https://www.researchgate.net/publication/274747519_GasLiquids_Separators_Quantifying_Separation_Performance_-_Part_2)

CAMPBELL, John. Gas conditioning and processing. Volume 2: The equipment modules. [En línea]. Campbell Petroleum Series. U.S.A, 1984. pp. 396-420. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/122207008/Gas-Conditioning-and-Processing-Volume-2-John-Campbell-Co>

CARTAXO, Samuel; SILVINO, Pedro & FERNANDES, Fabiano. Transient analysis of Shell-and-tube heat exchangers using an educational software. [En línea]. Chemical Engineers. Universidade Federal do Ceara: Fortaleza, CE, Brazil, 2014. [Consultado el 7 de junio de 2018]. Disponible en: <http://daneshyari.com/article/preview/178485.pdf>

DABAGHIAN, Zoheir; MOVAGHARNEJAD, Kamyar & MOHAMMADI, Maedeh. Development of educational software for undergraduate chemical engineering courses. [En línea]. Computer Applications in Engineering education. April 2016. [Consultado el 7 de junio de 2018]. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/cae.21733>

ECOPETROL S.A. Gas Natural: ¿Qué es el gas natural?. [En línea]. Septiembre 2014. [Consultado el 22 de marzo de 2018]. Disponible en: [https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/gas-natural/Informaci%25C3%25B3n%2520General/que-es-el-gas-natural/%21ut/p/z0/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8ziLQ](https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y-servicios/productos/gas-natural/Informaci%25C3%25B3n%2520General/que-es-el-gas-natural/%21ut/p/z0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8ziLQ)

FARAG, Hassan, MOHAMED, Mustafa, AMER, Hoda & NASHED, Adel William. Natural gas dehydration by desiccant materials. [En línea]. Volumen 50. Alexandria University: Egypt, December, 2011. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.01.020>

FERNANDES, Fabiano & RODRIGUES, Sueli. Educational Software for Gas-Solid and Liquid-solid separation equipment [En línea]. Wiley InterScience. 2004. [Consultado el 7 de junio de 2018]. Disponible en: DOI 10.1002/cae.10051

GAS PROCESSING & LNG. Proper regeneration of molecular sieves in TSA processes-Part 1. [En línea]. Gulf Publishing Holdings LLC. 2018. [Consultado el 17 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://gasprocessingnews.com/features/201802/proper-regeneration-of-molecular-sieves-in-tsa-processes%E2%80%94part-1.aspx>

GPSA, Engineering data book. Volume II. Section 20. Oklahoma, 2004. pp. 1-40.

HEROLD, Ruud & MOKHATAB, Saeid. Optimal design and operation of molecular sieve gas dehydration units - Part 1. [En línea]. Gas Processing. Gulf Publishing Holdings LLC. Nova Scotia, Canada, 2017. p.6. [Consultado el 12 de abril de 2018]. Disponible en: <http://gasprocessingnews.com/features/201708/optimal-design-and-operation-of-molecular-sieve-gas-dehydration-units%E2%80%94part-1.aspx>

HEROLD, Ruud & MOKHATAB, Saeid. Optimal design and operation of molecular sieves for gas dehydration - Part 2. [En línea]. Gas Processing. Gulf Publishing Company. 2017. [Consultado el 18 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.gasprocessingnews.com/features/201710/optimal-design-and-operation-of-molecular-sieves-for-gas-dehydration%E2%80%94part-2.aspx>

KEENGWE, Jared, ONCHWARI, Grace, & WACHIRA, Patrick. The use of computer tools to support meaningful learning. [En línea]. AACE Journal, 2008. 16(1), 77-92. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.597.7776&rep=rep1&type=pdf>

LAU, Hong. Competency Development for the Next Generation of Petroleum Engineers. [En línea]. SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. Abu Dhabi, November 2017, pp. 13–16. [Consultado el 8 de junio de 2018]. Disponible en: <https://doi.org/10.2118/188466-MS>

LONA BATISTA, Liliane, FERNANDES, Fabiano, ROQUE, Marcia, & RODRIGUES, Sueli. Developing an educational software for heat exchangers and heat exchanger networks projects. [En línea]. Volumen 24. Campinas, Brazil, October 2001. [Consultado el 7 de junio de 2018]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(00\)00324-0](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00324-0)

LYONS, William. Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering. [En línea]. Gulf Publishing Company. Volumen 2.1996. pp. 792 -793. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-88415-643-7.X5007-9>

MOHAMMED, Al-Khamis & AHMED, Al-Harbi. A Success Story: Extending Molecular sieve life by double. International Petroleum Technology Conference. Dubai, December 2007.

MOSHFEGHIAN, Mahmood. ¿What is the impact of feed gas conditions on the adsorption dehydration system?. [En línea]. PetroSkills. 2015 [Consultado el 10 de mayo de 2018 ]. Disponible en: <https://www.petroskills.com/blog/entry/what-is-the-impact-of-feed-gas-conditions-on-the-adsorption-dehydration-system#.W7amhGhKjIU>

MOSHFEGHIAN, Mahmood. Variation of Ideal Gas Heat Capacity Ratio with Temperature and Relative Density. [En línea]. July 2009. Disponible en: <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2013/05/variation-of-ideal-gas-heat-capacity-ratio-with-temperature-and-relative-density/>

ROSEN, Marc. Engineering Education: Future Trends and Advances. [En línea]. University of Ontario: Canada, 2009. [Consultado el 10 de junio de 2018]. Disponible en: <http://www.uoit.ca>

SANTOS, Myrlla, CORREIA, Leilane, DE MEDEIROS, José & DE QUEIROZ, Ofélia. Natural gas dehydration by molecular sieve in offshore plants: Impact of increasing carbon dioxide content. [En línea]. Volumen 149. Energy Conversion and Management. October 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.005>

THOMPSON, Richard & MANNING, Francis. Oilfield Processing of Petroleum. [En línea]. Pennwell Publishing Company. Tulsa, Oklahoma, 1991. p.172-177. Disponible en: [https://books.google.com.co/books?id=FnDp8V9TX9oC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=FnDp8V9TX9oC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

TUDOR, Thomas. Molecular sieves in petroleum and natural gas processing. [En línea]. World Petroleum Congress: Germany, 1963. [Consultado el 30 de octubre de 2017]. Disponible en: <https://www.onepetro.org/conference-paper/WPC-10211>

ZAMORA, María de los Ángeles. Conceptos fundamentales de la ingeniería de producción de gas natural. Universidad Nacional Autónoma de México. 2015.

ZOU, Changjun; ZHAO, Pinwen; WANG, Meng; LIU, Delei; WANG, Hongda; WEN Zhang. Failure analysis and faults diagnosis of molecular sieve in natural gas dehydration. [En línea]. Volumen 34. ELSEVIER, December 2013. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.07.031>

## ANEXOS

### Anexo A. Manual del usuario

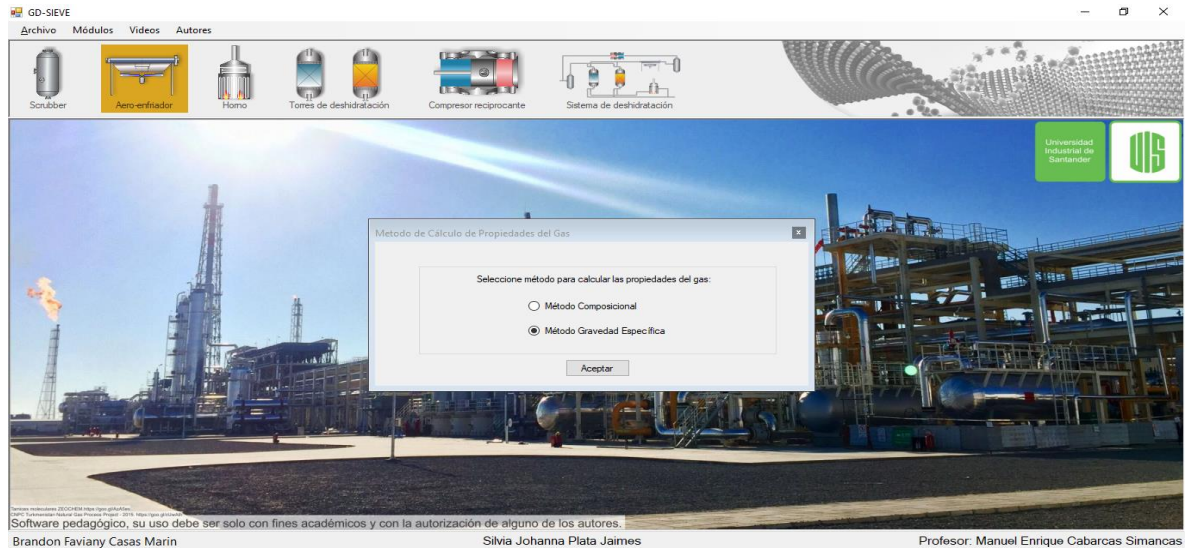
1. Descargue la carpeta “GD-SIEVE” y guárdela en una ubicación de interés, asegúrese que el ordenador donde esté descargado el programa posea net framework 4.0.
2. Ejecute el archivo llamado “GDSIEVE”, inmediatamente se abrirá la ventana que se muestra a continuación:



El software se divide en 6 módulos: scrubber, aero-enfriador, horno, torres de adsorción, compresor y sistema de deshidratación. El usuario deberá ingresar en la ventana inicial de cada módulo los datos para poder realizar el diseño y visualizar sus resultados.

3. En cada uno de los módulos se dan dos opciones para los cálculos de las propiedades del gas: (1) Método composicional y (2) Método gravedad

específica. Si el usuario selecciona la primera opción aparecerá una ventana donde deberá incluir la composición molar del gas y posteriormente se abrirá la ventana inicial del equipo.



En caso de seleccionar la segunda opción, se mostrará la ventana inicial y el usuario deberá ingresar la gravedad específica y seleccionar una de las cuatro correlaciones para calcular el factor de compresibilidad. Antes de poder realizar el diseño de cada equipo, deberá dar clic en el botón de propiedades del gas, donde se desplegará la siguiente ventana:

- **Ventanas de ayuda:** El software incluye ventanas de ayuda a las cuales se puede acceder por medio de los botones azules de información que se muestra en la imagen, dichos botones despliegan formularios que contienen información más detallada del cálculo.
- **Datos comunes:** Los datos operacionales que en todos los módulos serán pedidos para poder realizar el diseño de los equipos son: Presión, temperatura, caudal y gravedad específica en caso de ser este el método para calcular las propiedades del gas.

## Módulo diseño del Scrubber

- En este segmento el usuario deberá incluir todos los datos que se mostraron en la segunda imagen del manual, es decir, además de los datos comunes será necesario la °API del condensado y seleccionar el factor Ks.

### 4.1 Factor Souder-Brown (Ks)

El factor Ks es dependiente del tipo de extractor de niebla que se seleccione, los cuales también aparecen en esta lista.

- Una vez realizado el paso anterior, el usuario puede continuar intuitivamente hasta llegar a la ventana que se mostrará a continuación, donde tendrá que escoger el dispositivo de entrada y la velocidad del líquido en la boquilla de salida para completar el diseño del scrubber.

### 5.1 Velocidad del líquido en la boquilla de salida

Se dan tres opciones de velocidad para calcular el diámetro de la boquilla, sin embargo, el más común es 3.5 ft/s

## 5.2 Dispositivo de entrada

El usuario tiene la posibilidad de escoger entre cuatro dispositivos de entrada, su elección dependerá de la función(es) que necesite de dicho dispositivo. Si el diámetro de la boquilla calculado no entra en los diámetros comerciales, aparecerá un mensaje de error indicando que se debe cambiar el dispositivo de entrada.

6. Finalmente, se desplegará la última ventana donde se muestra el diseño final del scrubber junto con los datos obtenidos en las ventanas anteriores.

GD-SIEVE

Archivo Módulos Videos Autores

Scubber Aero-enfriador Horno Torres de deshidratación Compresor reciprocante Sistema de deshidratación

Universidad Industrial de Santander

Diseño Scrubber

$D_{\text{gas out}} = 16$  in

$X_4 = 1$  ft

$X_3 = 3.4$  ft

$D_{\text{in}} = 24$  in

$X_1 = 2.7$  ft

$h_1 = 3.2$  ft

$D_{\text{gas in}} = 2$  in

$X_2 = 3$  ft

$H_1 = 14.3$  ft

$D = 6.76$  ft

LSDH

Atras

Software pedagógico, su uso debe ser solo con fines académicos y con la autorización de alguno de los autores.  
Brandon Faviany Casas Marin, Silvia Johanna Plata Jaimes, Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

## ***Módulo diseño del aero-enfriador***

7. En este módulo después de realizar el paso 3, el usuario deberá incluir los datos de entrada, algunos de estos están por default, pero si el usuario desea cambiarlos lo podrá hacer. Primero se debe calcular las propiedades del gas para que se habiliten todos los datos para el diseño del equipo.

**Datos de ingreso diseño del aero-enfriador**

**Datos de entrada del proceso**

Temperatura de entrada	250	°F
Temperatura de salida	150	°F
Flujo másico	277000	lb/h
Presión de entrada	750	psig
Factor de Compresibilidad del gas:	Heidaryan et al. (2010)	
Gravedad específica	0.75	-
Carga de calor, Duty		MMBTU/H
Coefficiente global de transferencia de calor	4.2	BTU/H-ft <sup>2</sup> -°F

Ayuda coeficiente global de transferencia de calor, Ux

**Datos del aire**

Temperatura de entrada	77	°F
Elevación sobre el nivel del mar	500	ft
Velocidad de la cara	600	ft/min
Densidad del aire	0.07393	lb/ft <sup>3</sup>
Factor corrección por elevación	0.983	-
Densidad del aire corregida	0.07267	lb/ft <sup>3</sup>

**Propiedades gas de proceso**

**Datos de entrada del arreglo y tubería**

Diámetro externo de la tubería	1	ft
Alura de la aleta	5/8	in
Densidad de aletas	10	/in
Pitch de la tubería	2 1/2	in
Número de filas	6	-
Longitud de la tubería	300	ft
Arreglo de los ventiladores	1 Ventilador, 3 pasos	

**Eficiencias**

Eficiencia del ventilador	0.75	Facción
Eficiencia del motor	0.95	Facción

**Relación de áreas**

APP	5.58	ft <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup>
APSF	160.8	ft <sup>2</sup> /ft <sup>2</sup>

Ayuda relación de áreas

Brandon Faviany Casas Marin      Silvia Johanna Plata Jaimes      Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

## 7.1 Pitch de la tubería

Es el espaciamiento entre los tubos que depende del tipo de arreglo, ya sea cuadrado o triangular. Dentro de dichos tubos es por donde fluye el gas a enfriar.

8. Después de incluir los datos el usuario puede continuar, y se va a desplegar una ventana de iteraciones de los parámetros del diseño del aero-enfriador. Los resultados de estos y los cálculos de la geometría del equipo junto con las ecuaciones de cómo fueron obtenidos se muestran en las ventanas siguientes.

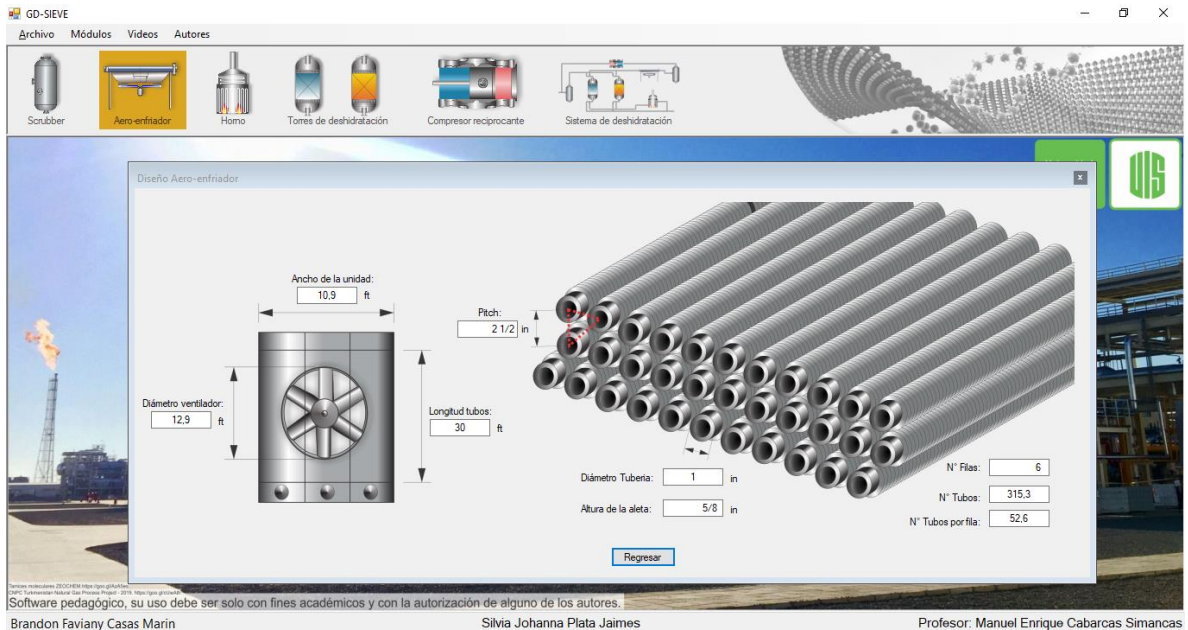
**Búsqueda temperatura de salida del aire**

Iteración	T2 [°F]	T1 [°F]	T2 [°F]	t1 [°F]	LMTD	R	P	F	CMTD	Bare Area [ft <sup>2</sup> ]	Face Area [ft <sup>2</sup> ]	Air flow [ft <sup>3</sup> /hr]	Air flow [lb/hr]	Δt [°F]	t <sup>2</sup> Calculad [°F]	Tmin [°F]	Trsk [°F]
1	129	250	150	77	94.987	1.923	0.301	1	94.987	43564.86	270.93	9753480	708785.39	101.75	178.75	77	250
2	189.5	250	150	77	66.554	0.889	0.65	0.955	63.559	65106.36	404.89	14576040	1059240.83	68.08	145.08	129	250
3	159.25	250	150	77	81.553	1.216	0.475	0.974	79.432	52095.42	323.98	11663280	847570.56	85.09	162.09	129	189.5
4	174.375	250	150	77	74.305	1.027	0.563	0.973	72.298	57235.86	355.94	12813840	931181.75	77.45	154.45	159.25	189.5
5	166.813	250	150	77	77.983	1.113	0.519	0.973	75.877	54536.89	339.16	12209760	887283.26	81.28	158.28	159.25	174.375
6	163.032	250	150	77	79.79	1.162	0.497	0.97	77.386	53472.74	332.54	11971440	869964.54	82.9	159.9	159.25	166.813
7	161.141	250	150	77	80.67	1.188	0.486	0.97	78.249	52883.01	328.87	11839320	853363.38	83.82	160.82	159.25	163.032
8	160.196	250	150	77	81.112	1.202	0.481	0.972	78.840	52486.59	326.41	11790760	853927.73	84.45	161.45	159.25	161.141
9	160.669	250	150	77	80.891	1.195	0.484	0.971	78.545	52684.39	327.64	11795040	857145.56	84.14	161.14	160.196	161.141
10	160.905	250	150	77	80.78	1.192	0.485	0.971	78.437	52756.93	328.09	11811240	858322.81	84.02	161.02	160.669	161.141
11	161.023	250	150	77	80.725	1.19	0.486	0.97	78.303	52847.21	328.65	11831400	859787.84	83.88	160.88	160.905	161.141
12	160.964	250	150	77	80.753	1.191	0.485	0.971	78.411	52774.42	328.2	11815200	858610.58	83.99	160.99	160.905	161.023
13	160.994	250	150	77	80.739	1.191	0.486	0.971	78.397	52783.17	328.25	11817000	858741.39	83.98	160.98	160.964	161.023
14	160.979	250	150	77	80.746	1.191	0.485	0.971	78.404	52779.13	328.23	11816280	858689.07	83.98	160.98	160.964	160.994
15	160.987	250	150	77	80.742	1.191	0.485	0.971	78.400	52781.83	328.25	11817000	858741.39	83.98	160.98	160.979	160.994

Ver gráfica factor de corrección      Regresar      Siguiente

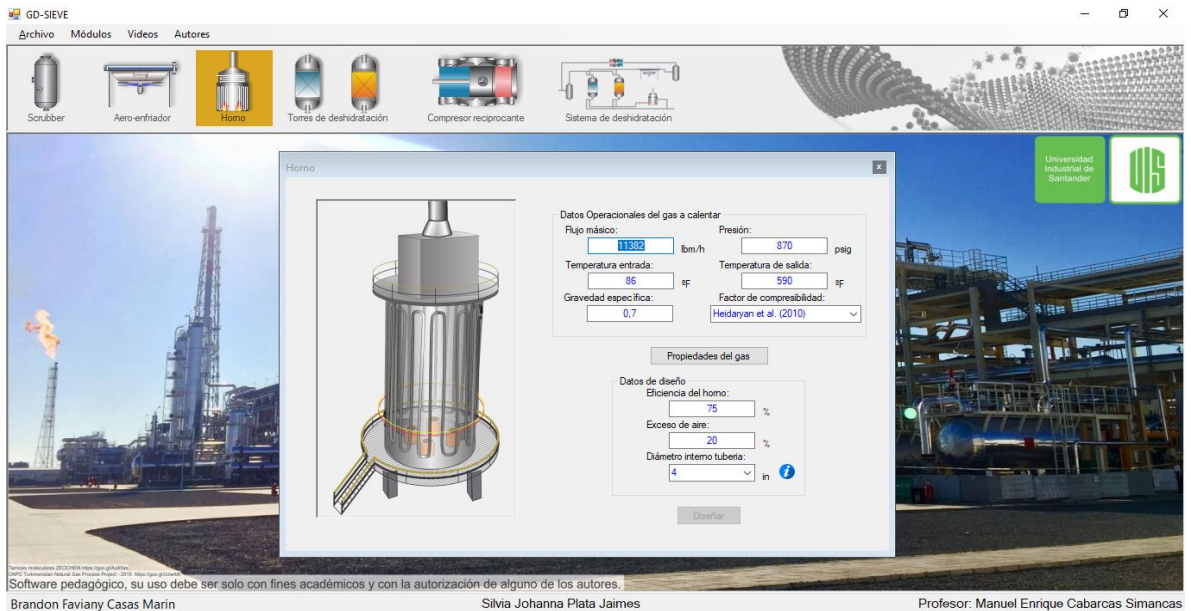
Brandon Faviany Casas Marin      Silvia Johanna Plata Jaimes      Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

9. Una vez realizado los dos pasos anteriores, el usuario solo tendrá la posibilidad de continuar o regresar de una a otra ventana, hasta finalmente llegar al diseño donde se encuentran los datos más importantes que se obtuvieron, entre los que se destacan: LMTD, temperatura de salida del aire, diámetro del ventilador, número de tubos, ancho de la unidad, entre otros.



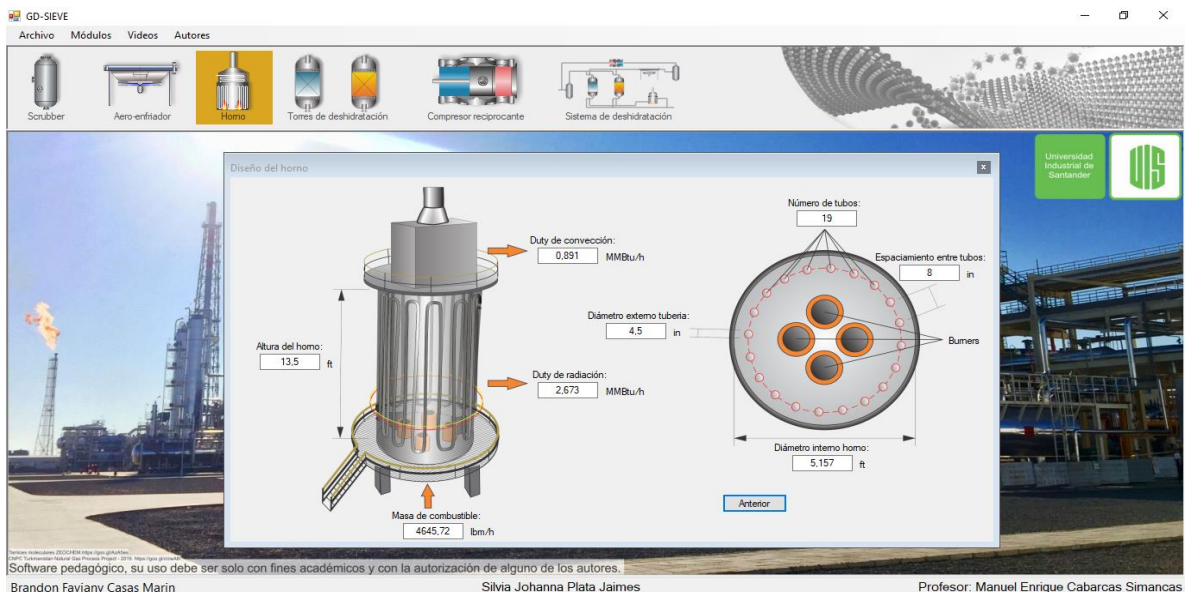
### ***Módulo diseño del horno***

10. En la ventana inicial es necesario incluir datos como flujo másico, la temperatura hasta la cual se requiere calentar el gas, eficiencia del honor, exceso de aire y el diámetro interno de la tubería por donde fluye el gas.



11. Este módulo es muy similar al aero-enfriador, debido a que el usuario solo tendrá que continuar a las siguientes ventanas donde se muestran cálculos como el Duty, el cual es necesario para determinar el área de la tubería; dimensiones del horno y masa de gas combustible.

12. Finalmente, el usuario llegará al diseño del horno.



## Módulo diseño de las torres de deshidratación

13. En este módulo además de los datos comunes mencionados anteriormente, es necesario introducir el número de lechos, tiempo de adsorción y el tipo de partícula para el diseño de adsorción.

The screenshot shows the GD-SIEVE software interface. The main window is titled "Adsorción y Regeneración" and displays a schematic of three vertical adsorption towers connected by a horizontal pipe system. The towers are labeled "Torre de Adsorción y Regeneración". To the right of the schematic is a control panel with the following fields:

- Datos de entrada**
  - Datos Operacionales**
    - Presión: 870 psig
    - Temperatura: 86 °F
    - Caudal: 71 MMscfd
    - Gravedad específica: 0.66
    - Factor de Compresibilidad del gas: Heidaryan et al. (2010)
  - Propiedades del gas** (button)
  - Torres de Adsorción**
    - Nº Lechos: 2
    - Tiempo adsorción: 12 hr
    - Tipo de Partícula: Pellets de 1/8 in
  - Diseñar** (button)

At the bottom of the window, there is a footer with the following text: "Software pedagógico, su uso debe ser solo con fines académicos y con la autorización de alguno de los autores. Brandon Faviany Casas Marin Silvia Johanna Plata Jaimes Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas"

### 13.1 Número de lechos

Hace referencia al número de lechos o torres que van a estar en adsorción, es decir, si son tres torres en total dos (2) estarán en adsorción y una (1) en regeneración. El software sugiere un valor que va a depender del caudal, sin embargo, el usuario podrá cambiarlo y escoger entre las tres opciones

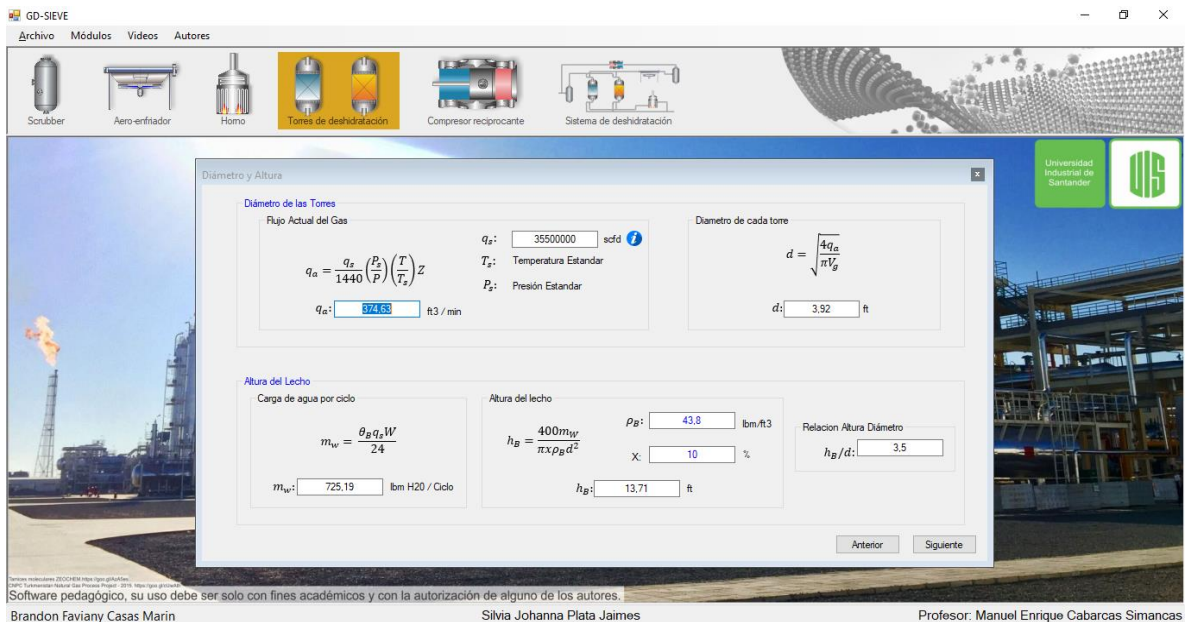
### 13.2 Tiempo de adsorción

Es el tiempo que va a durar realizando la adsorción la torre, este también es sugerido por el software y puede ser cambiado.

### 13.3 Tipo de partícula

El tipo de partícula hace referencia al tamaño y forma del tamiz molecular.

14. Después de los dos pasos anteriores, el usuario puede continuar a la ventana donde se muestran los resultados de la velocidad del gas superficial y seguir a la ventana de cálculo de diámetro y altura de la torre.



### 15.1 Densidad aparente del desecante

El software proporciona la densidad del desecante, sin embargo, el usuario puede modificarlo en un rango entre 42-45 lbm/ft<sup>3</sup>.

### 15.2 Capacidad útil del desecante

La capacidad de diseño que reconoce la pérdida de capacidad de desecante con el tiempo este valor se encuentra en un rango de 7-14%.

### 15.3 Relación altura/diámetro

La relación altura diámetro debe estar entre 2.5-6, de no ser así aparecerá un mensaje de error y deberá cambiar el tiempo de adsorción y/o el número de lechos.

15. A continuación, se despliega la ventana con los cálculos de caída de presión, altura de la zona de transferencia de masa y la capacidad útil del desecante.

The screenshot shows the 'Caída de Presión, Altura MTZ, Capacidad Útil' window in the GD-SIEVE software. It contains the following data and equations:

- Caída de Presión:**

$$\frac{\Delta P}{L} = B\mu V_p^2 + C\rho_p V_p^3$$

$$\frac{\Delta P}{L}: 0.63 \text{ psi/ft} \quad \Delta P: 4.27 \text{ psi}$$
- Longitud Zona de Transferencia de Masa:**

$$h_z = A \left[ \frac{(Q_p)^{0.2389} (W)^{0.7895} (RH)^{0.5249}}{d^{0.4778}} \right] \left[ \frac{P}{P_0} \right]^{0.5506} F_m$$

$$h_z: 2.98 \text{ ft}$$
- Capacidad Útil del Desecante:**

$$x = \frac{x_s h_B - 0.45 h_z x_z}{h_B}$$

$$x_s: 14 \quad x: 12.63$$

On the right, there is a 'Proceso de Adsorción' diagram showing three adsorption towers at different stages: 'Tiempo = 0', 'Tiempo = 1-1/2', and 'Tiempo = 2-1/2'. The diagram labels the beds as AZ (Adsorption Zone) and EZ (Empty Zone) with a Mass Transfer Zone (MTZ) in between. Below the diagram is the citation: 'SANDEEP, J. Proper regeneration of molecular sieves in TSA processes-Part 1'.

Software pedagógico, su uso debe ser solo con fines académicos y con la autorización de alguno de los autores.  
 Brandon Faviany Casas Marin      Silvia Johanna Plata Jaimos      Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

16. Una vez terminado todos los cálculos de las torres de adsorción, se muestra el diseño final de las torres y la opción de realizar el ciclo de regeneración.

The screenshot shows the 'Diseño Torres de Adsorción' window in the GD-SIEVE software. It displays a schematic of three adsorption towers and a 'Diseñar Torre De Regeneración' panel.

**Torre de Regeneración Parameters:**

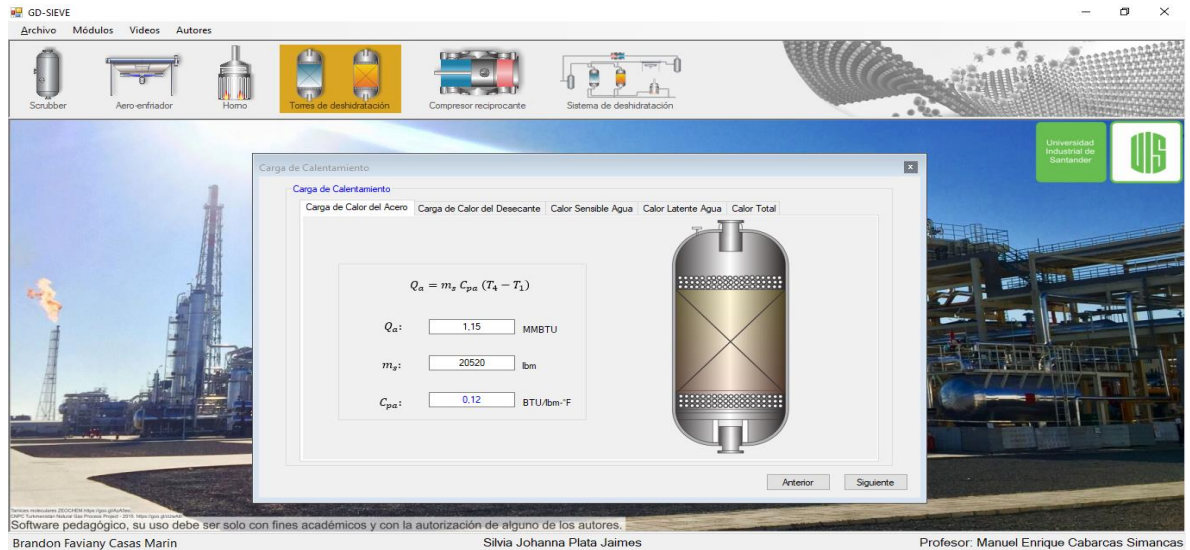
- Datos De Entrada:**
  - Temperatura de salida del calentador:  $T_3: 590$  °F
  - Temperatura de salida del lecho:  $T_4: 554$  °F
- Gravedad Específica:**  $\gamma: 0.59$  sf
- Tiempo de calentamiento:**  $\theta_3: 4.5$  h
- Tiempo de enfriamiento:**  $\theta_4: 1.5$  h
- Capacidad calorífica:**  $C_p: 0.55$  BTU/lbm · °F

**Final Design Dimensions:**

- Altura Lecho: 13.71 ft
- Altura MTZ: 2.98 ft
- Diámetro: 3.92 ft
- Tipo de Partícula: Perlas de 1/8 in

Software pedagógico, su uso debe ser solo con fines académicos y con la autorización de alguno de los autores.  
 Brandon Faviany Casas Marin      Silvia Johanna Plata Jaimos      Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

17. La ventana de cargas de calentamiento del acero, desecante, calor sensible y latente del agua es mostrada a continuación, donde es necesario conocer la capacidad calorífica del acero, desecante y del agua y el calor de desorción, los cuales son suministrados por el software y pueden ser modificados por el usuario.



18. En la ventana contigua, es hallada la masa de gas de calentamiento y el caudal estándar del gas de regeneración.

19. Las cargas de enfriamiento son halladas y las capacidades caloríficas son las mismas que las utilizadas para los cálculos de las cargas de calentamiento y la temperatura de salida del lecho ( $T_5$ ) es aproximadamente 18-27°F mayor que la temperatura del gas de enfriamiento.

GD-SIEVE

Archivo Módulos Videos Autores

Scrubber Aero-enfriador Horno Torres de deshidratación Compresor reciprocante Sistema de deshidratación

Universidad Industrial de Santander

Software pedagógico, su uso debe ser solo con fines académicos y con la autorización de alguno de los autores.

Brandon Faviany Casas Marin Silvia Johanna Plata Jaimes Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

20. La ventana final muestra los cálculos del duty del horno y el aero-enfriador.

## Módulo diseño del compresor

21. En este módulo además de los datos en común con los demás equipos es necesario conocer la presión de descarga y la eficiencia ya sea isentrópica o politrópica. Si se escoge esta última, se desplegarán dos opciones (1) calcular el exponente politrópico, (2) Ingresar el exponente.

GD-SIEVE

Archivo Módulos Videos Autores

Scrubber Aero-enfriador Horno Torres de deshidratación Compresor reciprocante Sistema de deshidratación

Universidad Industrial de Santander

Software pedagógico, su uso debe ser solo con fines académicos y con la autorización de alguno de los autores.

Brandon Faviany Casas Marin Silvia Johanna Plata Jaimes Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

## 22.1 Ayuda eficiencia politrópica

Esta opción aparecerá si se selecciona calcular el exponente politrópico. La eficiencia politrópica es hallada tanto numérica y gráficamente.

22. Una vez realizado el paso anterior, el usuario puede continuar a la siguiente ventana donde es posible calcular la temperatura de descarga y la potencia.

GD-SIEVE

Archivo Módulos Videos Autores

Scrubber Aero-enfriador Horno Torres de deshidratación Compressor recíprocante Sistema de deshidratación

Sistema de compresión una etapa

Cambio de exponente isentrópico a politrópico

$$\frac{n-1}{n} = \left(\frac{k-1}{k}\right) \left(\frac{1}{E_{poly}}\right)$$

Exponente politrópico "n" n: 0

Temperatura de descarga

$$T_D = T_1 \left[ 1 + \frac{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1}{E_{poly}} \right]$$

T2: 110 °F

Eficiencia del compresor

Eficiencia Global: 0,760

Potencia del compresor

$$HP = 3,03 + \frac{Q_g T_1}{E} \left( \frac{Z_1 + Z_2}{2} \right) \left( \frac{n}{n-1} \right) \left( \frac{P_{sc}}{T_{sc}} \right) \left( \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right)$$

Potencia: 0,0 HP

Z1: 0,97  
T1: 110  
P1: 214,7

Z2: 0,958  
T2: 110  
P2: 314,7

k: Relación de calor específico, [C<sub>p</sub>/C<sub>v</sub>]  
Y<sub>g</sub>: Gravedad específica del gas  
E<sub>isen</sub>: Eficiencia isentrópica  
E: Eficiencia global (Fracción)

Q<sub>g</sub>: Caudal de gas, [MMscf/día]  
P<sub>2</sub>: Presión de descarga  
P<sub>1</sub>: Presión de entrada  
T<sub>1</sub>: Temperatura de succión, [°R]  
T<sub>2</sub>: Temperatura de descarga, [°R]

Z<sub>1</sub>: Factor de compresibilidad de entrada  
Z<sub>2</sub>: Factor de compresibilidad de salida  
T<sub>sc</sub>: Temperatura ambiente, [°R]  
P<sub>sc</sub>: Presión a condiciones estándar, [psia]

Anterior Diseño Detallado

Software pedagógico, su uso debe ser solo con fines académicos y con la autorización de alguno de los autores.  
Brandon Faviany Casas Marin Silvia Johanna Plata Jaimes Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

## 23.1 Eficiencia del compresor

Es necesario calcular la eficiencia del compresor para poder obtener la potencia de este. Para ello, es necesario conocer la eficiencia politrópica y mecánica con el fin de hallar la eficiencia global. Si el usuario quiere obtener un diseño más detallado puede continuar intuitivamente el software, hasta llegar al diseño final.

GD-SIEVE

Archivo Módulos Videos Autores

Scrubber Aero-enfriador Horno Torres de deshidratación Compressor reciprocante Sistema de deshidratación

Sistema de compresión una etapa

Cambio de exponente isentrópico a politrópico

$$\frac{n-1}{n} = \left(\frac{k-1}{k}\right) \left(\frac{1}{E_{poli}}\right)$$

Exponente politrópico "n": 0

Potencia del compresor

$$HP = 3,03 \cdot \frac{Q_g T}{E}$$

Potencia

Temperatura de descarga

Eficiencia del compresor

Correlación  Correlación Método gráfico  Método gráfico

$E_{Global} = E_{Politrópica} \cdot E_{Mecánica}$

Eficiencia politrópica: 0,8

Eficiencia mecánica: 0,95

Global: 0,760

Velocidad del compresor: [ ]

Altas velocidades [v]

Ver cálculo de la eficiencia global

Campbell, J. M. (1955). COMPRESSORS SYSTEMS: MECHANICAL DESIGN AND SPECIFICATION. PetroSkills.

Continuar

Inicio del compresor

Global: 0,760

Zz: 0,958

Tz: 110

Pz: 314,7

Anterior Diseño Detallado

Software pedagógico, su uso debe ser solo con fines académicos y con la autorización de alguno de los autores.  
 Brandon Faviany Casas Marín Silvia Johanna Plata Jaimes Profesor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

## Módulo diseño del sistema de deshidratación

Para este módulo solo es necesario realizar los mismos pasos que para los cinco módulos anteriores.

